



**Российская академия наук
Карельский научный центр**

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ СРЕДНЯЯ ПАДМА**

3

4

14

20

35

47

55

59

65

74

84

91

103

109

Карельский научный центр
Российской академии наук

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СРЕДНЯЯ ПАДМА

Петрозаводск
2005

УДК 553(470.22)

Экологические проблемы освоения месторождения Средняя Падма. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. – 110 с. + вкл.

В работе содержатся результаты комплексных исследований территории Заонежского полуострова. Они включают характеристику его геологического строения и месторождений полезных ископаемых; оценку состояния почвенного покрова и растительности, поверхностных и подземных вод, распределение макро- и микроэлементов в торфяных залежах и донных отложениях озер и других экосистемах района; моделирование возможных изменений состояния окружающей среды и биоты района. К тексту прилагается серия специальных карт.

Редакционная коллегия: Е. П. Иешко (отв. редактор), Н. А. Белкина, Г. С. Бородулина, Н. В. Виноградова, А. И. Голубев, А. А. Лукин, А. И. Максимов, А. К. Полин, Д. С. Рыбаков, Л. П. Рыжков, А. И. Слабунов, О. М. Федоренко, Н. Г. Федорец.

Рецензенты: Э. В. Ивантер, А. В. Федюк

Печатается при финансовой поддержке Государственного комитета Республики Карелия по лесному и горнопромышленному комплексу

ISBN 5-9274-0185-6

© Карельский научный центр РАН, 2005

Введение

В последнее десятилетие проблема освоения месторождения Средняя Падма, обусловленная необходимостью решения острых социально-экономических задач Медвежьегорского района и Республики Карелия в целом при сохранении благоприятной природной и историко-культурной среды, вызвала напряженную дискуссию в средствах массовой информации с активным участием различных групп ученых, специалистов и представителей общественности.

Возникновение дискуссии обусловлено объективными причинами. С одной стороны, горно-рудная промышленность является сильным фактором бурного и стабильного экономического развития многих стран и регионов, расположенных в различных физико-географических и климатических зонах. С другой стороны, с горнорудной промышленностью во всем мире связаны наиболее мощные изменения состояния окружающей среды. Это проявляется, прежде всего, в изъятии и механическом повреждении значительных массивов земель и горных пород, изменении гидрологического режима поверхностных и подземных вод. При этом современные технологии зачастую позволяют использовать лишь небольшую часть извлекаемой массы пород. Все остальное накапливается в виде отходов, рассеиваемых природными миграционными процессами и являющихся источниками загрязнения окружающей среды химическими элементами.

В связи с этим введение в экономический оборот новых территорий требует тщательного предварительного исследования их современного экологического состояния, моделирования основных особенностей поведения потенциальных загрязнителей окружающей среды. В предлагаемом издании изложены результаты таких исследований, включающие:

- характеристику геологического строения и месторождений полезных ископаемых Заонежья, которые в перспективе могут стать объектами горной добычи и последующей металлургической переработки;
- оценку состояния почвенного покрова и растительности, поверхностных и подземных вод, распределение макро- и микроэлементов в торфяных залежах и донных отложениях озер и в других экосистемах Заонежского полуострова. Приведенные данные позволяют определить положение, параметры и условия формирования естественных аномалий содержания тяжелых металлов и радиоактивных элементов в различных средах Заонежья. Эти данные впоследствии могут служить в качестве исходных для оценки происшедших изменений в случае начала промышленной добычи полезных ископаемых или иной антропогенной деятельности в существенных масштабах;
- моделирование предполагаемых изменений состояния окружающей среды и биоты Онежского рудного района на примере разработки уран-ванадиевых руд месторождения Средняя Падма. Поскольку при проведении моделирования не учитываются возможные технологии освоения месторождения, включая технологические процессы добычи и переработки минерального сырья, отходы, способы их хранения и удаления, то все полученные выводы об изменении окружающей среды под воздействием разработки уран-ванадиевых руд месторождения Средняя Падма следует считать предварительными. Для более полной и достоверной оценки изменения окружающей среды и определения вероятного эколого-экономического ущерба освоения месторождения Средняя Падма необходимо выполнить весь комплекс экологических исследований и расчетов в соответствии с «Положением об оценке воздействия на окружающую среду в Российской Федерации», утвержденным Минприроды России от 18 июля 1994 г. за № 222, и другими нормативными актами в области охраны окружающей среды и рационального природопользования.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И УРАН-ВАНАДИЕВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАОНЕЖЬЯ

А. И. ГОЛУБЕВ¹, Ю. Н. НОВИКОВ²

¹ Институт геологии Карельского научного центра РАН

² ООО «Гранитная гора» (Петрозаводск)

Онежский синклиний сложен комплексом нижнепротерозойских пород, представляющих собой как бы гигантский останец некогда широко развитого покрова протерозойских образований, перекрывающих породы архея. В строении разреза нижнепротерозойских образований на Заонежском полуострове принимают участие породы ятулийского, людиковийского и калевийского надгоризонтов. Палеофациальными исследованиями установлено, что формирование пород заонежской свиты протекало в бассейне с восстановительными физико-химическими условиями осадконакопления (необходимыми как для накопления углерода, так и для выпадения сульфидов) при довольно спокойной динамике среды. Процессы осаднения были осложнены излияниями лав и внедрением силлов габбро-долеритов. Вулканические излияния оказали существенное влияние и на процессы осадконакопления, и на геохимическую специализацию комплекса в целом. Минерагенические особенности района связываются с зонами структурно-разрывных дислокаций, к которым приурочены месторождения комплексных Cu-U-Mo-V руд. В настоящее время выделено семь зон, в которых отмечаются повышенные до аномальных содержания Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Mo, Bi, Au, Ag, Pt, Pd и других элементов. Следует отметить, что процессы рудообразования, ведущими признаками которых являются проявления приразломного натриевого метасоматоза, слюдизации и карбонатизации, а также указанный спектр аномальных концентраций элементов, контролируются осевыми разломами и зонами смятия.

A. I. GOLUBEV, Y. N. NOVIKOV. GEOLOGICAL STRUCTURE AND URANIUM-VANADIUM DEPOSITS IN THE LAKE ONEGA REGION (ZAONEZH'YE)

The Onega synclinorium is composed of a Lower Proterozoic rock complex which occurs as a giant remnant of a formerly extensive Proterozoic nappe resting on Archean rocks. In the Zaonezhsky Peninsula, the Lower Proterozoic unit is formed by rocks of the Jatulian, Ludicovian and Calevian superhorizons. Paleofacies studies have shown that rocks of the Zaonezhskaya suite were generated in a basin with a reducing physico-chemical depositional environment required for carbon accumulation and sulphide precipitation, the environmental dynamics being fairly quiet. Precipitation was accompanied by lava flow and the intrusion of gabbro-dolerite sills. Volcanic eruptions had a substantial effect on both sedimentation processes and the geochemical specialization of the entire complex. The mineragenic characteristics of the study area are attributed to structural-rupture dislocation (SRD) zones to which complex Cu-U-Mo-V ore deposits are restricted. Seven zones with high to anomalous quantities of Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Mo, Bi, Au, Ag, Se, Pt, Pd and other elements are distinguished. It should be noted that ore-forming processes, indicated chiefly by near-fault Na metasomatism, micatization and carbonatization and the above spectrum of anomalous element concentrations, are controlled by axial faults and shear zones.

Ключевые слова: Онежский синклиний, структурно-разрывные дислокации, уран-ванадиевые месторождения, Заонежский полуостров.

Заонежский полуостров территориально расположен в центре крупной геологической структуры – Онежского синклинория, представляющего собой корытообразную депрессию в архейском гранито-гнейсовом фундаменте, заполненную нижнепротерозойскими образованиями. Замыкается структура на севере в районе г. Медвежьегорска, к югу она «ныряет» под Онежское озеро. Крылья синклинория осложнены структурами низшего порядка – синклиналями и антиклиналями, вытянутыми в северо-западном направлении с крутизной падения крыльев от 5 до 20° (прил. 1). Кроме того, очень пологая, пересекающаяся с первой системой складчатость северо-восточного направления придает узким вытянутым северо-западным структурам брахиморфный характер, т. е. вид замкнутых и на севере, и на юге корытообразных структур, особенно отчетливо прослеживаемых в центральной и западной частях Онежского синклинория. И, наконец, все эти структуры осложнены, в свою очередь, разрывными разломными нарушениями, тоже преимущественно северо-западного простирания. По этим нарушениям местами наблюдаются горстовые блоковые поднятия, наиболее характерно выраженные на водоразделе оз. Космозеро и губы Онежского озера – Святухи.

Большинство озер Заонежского полуострова, а также глубоко вдающихся в него губ и заливов Онежского озера имеют тектоническое происхождение. Это знаменитые Кижские шхеры, заливы и губы Онежского озера: Уницкая, Великая, Святуха, Кефть-губа и др.; озера: Падмозеро, Путкозеро, Космозеро: системы озер: Турастам – Нижнее и Верхнее Мягрозеро, Карасозеро – Ладмозеро и др.

Онежский синклинорий сложен комплексом нижнепротерозойских пород, представляющих собой как бы гигантский останец некогда широко развитого покрова протерозойских образований, перекрывающих породы архея.

В строении разреза нижнепротерозойских образований на Заонежском полуострове принимают участие породы ятулийского, лудиковийского и калевийского надгоризонтов.

Ятулийские образования Заонежского полуострова представлены известняками и доломитами, выходы которых фиксируются в обнажениях Южного Оленьего острова, у д. Кузаранда, а также вскрываются скважинами в районе деревень Типиницы, Тявзия, Фоймогуба, Тамбицы. В известняках и доломитах ятулия на разных уровнях встречаются многочисленные фитолиды – следы жизнедеятельности примитивных водорослей, возраст которых составляет около 2 млрд лет (Макарихин, Кононова, 1983).

Наиболее широко распространенными являются *образования лудиковия*, представленными породами заонежского и суйсарского горизонтов (свит), при этом породы заонежского

горизонта залегают согласно на разрушенных доломитах ятулия, иногда с местным размытием. В разрезе заонежских образований четко фиксируются две подсвиты – нижняя и верхняя. В состав нижней, карбонатно-глинистой, входят тонкозернистые слюдистые доломиты, карбонатсодержащие сланцы, алевролиты и реже песчаники.

Верхняя вулканогенно-осадочная подсвита представлена различными шунгитоносными породами, известными под общим названием шунгиты. Сюда входят высокоуглеродистые шунгиты с содержанием углерода от 26 до 98%, шунгитистые туфопесчаники и туфоалевролиты (содержание углерода 6–25%), малоуглеродистые шунгитсодержащие сланцы, известняки, доломиты, известковистые туфы, литиды (содержание углерода 0,1–5,0%). Вся толща осадочных и вулканогенно-осадочных образований подсвит пронизана согласными пластовыми интрузиями (силлами) габбро-долеритов общим числом до 8 и мощностью от 15 до 50 м и более. Местами здесь встречаются потоки и покровы базальтовых лав мощностью от 5–7 до 15–20 м. Суммарная мощность заонежского горизонта, по данным разных исследователей, варьирует в пределах от 1330 до 2700 м (Полеховский, Голубев, 1989).

Горные породы вышележащего суйсарского горизонта согласно, местами со стратиграфическим перерывом, фиксируемым конгломератами, перекрывают породы заонежского горизонта и представлены вулканогенно-осадочными образованиями. Встречаются они в западной части Заонежского полуострова, где слагают ядро крупной Мягрозерской (по некоторым источникам Мунозерской) синклинали. Мягрозерская синклиналь – структура второго порядка в составе Онежского синклинория, протянувшаяся вдоль восточного берега Уницкой губы более чем на 30 км. В состав пород горизонта входят грубопереслаивающиеся конгломераты, туфопесчаники и туфоалевролиты, сменяющиеся вверх по разрезу шунгитсодержащими, а затем бесшунгитовыми кварц-альбитовыми алевролитами и альбит-хлоритовыми сланцами. Мощность вулканогенно-осадочных образований суйсарской свиты в пределах Мягрозерской синклинали составляет около 350–400 м.

Самыми молодыми нижнепротерозойскими образованиями на Заонежском полуострове являются породы *калевийского надгоризонта*, залегающие в самом ядре Мягрозерской синклинали, которые прослеживаются по берегам оз. Мунозеро, в 2,5 км к северо-востоку от д. Красная Сельга. Представлены они песчанистыми известняками, известняками с микрофилитами, песчано-глинистыми сланцами и песчаниками. Мощность горизонта не превышает 90 м.

Палеофациальными исследованиями установлено, что формирование пород заонежской

свиты протекало в бассейне с восстановительными физико-химическими условиями осадконакопления (необходимыми и для накопления углерода, и для выпадения сульфидов) при довольно спокойной динамике среды. Процесс осаждения был усложнен излияниями лав и внедрением силлов габбро-долеритов (табл. 1.1). Вулканические излияния оказали существенное влияние как на процессы осадконакопления (накопление отложений субмаринных эксплозий, перемещенной тefры, аккумулятивных равнин, фумарольных полей), так и на геохимическую специализацию комплекса в целом.

В химическом составе пород верхней подсвиты заонежской свиты и ее аналогов из других структурно-формационных зон устанавли-

ваются некоторые закономерности (табл. 1.2). Содержание SiO_2 в породах постепенно увеличивается вверх по разрезу от первой ко второй пачке, где залегают слои кремнистых пород (лидитов). Соответственно в породах уменьшается содержание Al_2O_3 и MgO , наблюдается некоторое изменение основности пород. Сумма щелочей в породах остается более или менее постоянной, но резко различна в соотношениях K_2O и Na_2O . В породах первой пачки резко преобладает Na_2O , а во второй – K_2O , в породах третьей пачки щелочи содержатся в равных количествах. Это основной критерий разделения по составу шунгитовых пород нижнего и среднего продуктивных горизонтов, а также их практической значимости и геохимической специализации.

Таблица 1.1. Средние химические составы пород заонежского вулканического комплекса Онежской структуры (Голубев, Светов, 1983)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	48,67	47,66	49,43	48,08	48,58	50,51	51,17	48,57	48,44
TiO_2	1,71	2,73	1,21	2,03	1,93	1,71	2,39	2,13	1,56
Al_2O_3	13,89	13,77	13,70	13,77	13,81	13,27	12,11	13,02	14,08
Fe_2O_3	4,63	8,18	2,56	3,38	2,96	2,57	3,43	7,35	2,46
FeO	9,36	7,32	9,39	10,94	10,05	8,50	13,27	9,00	11,82
MnO	0,22	0,31	0,19	0,19	0,19	0,17	0,10	0,24	0,20
MgO	5,85	4,52	6,48	5,97	6,99	7,67	3,58	5,65	6,44
CaO	7,88	8,46	9,97	8,59	7,28	9,23	5,27	8,18	8,57
Na_2O	2,82	2,89	2,67	2,05	3,19	2,44	3,58	2,12	2,05
K_2O	1,05	1,14	0,66	1,19	0,50	0,96	1,20	0,75	0,56
P_2O_5	0,21	–	0,11	–	0,24	–	0,37	0,33	0,19
CuO	0,021	–	–	–	0,019	–	0,028	0,105	0,04
CoO	0,011	–	–	–	0,007	–	0,006	0,006	0,01
NiO	0,019	–	–	–	0,018	–	0,045	0,013	0,017
V_2O_5	0,067	–	–	–	0,072	–	–	0,084	0,066
Cr_2O_3	0,033	–	–	–	0,025	–	–	0,01	0,03
S	–	–	0,02	–	0,13	–	0,20	0,09	0,07
H_2O	0,41	0,67	–	0,78	0,65	0,31	0,80	0,74	0,25
ппп	3,78	3,14	3,16	3,83	3,97	2,83	3,44	2,99	2,98
Сумма	100,63	100,12	99,55	100,02	99,96	100,17	100,19	100,64	99,84
n	34	10	14	24	23	29	12	23	25

Примечание. Группы пород: 1 – базальтовые лавы Уницкой вулканической зоны; 2 – базальтовые лавы, окисленные, Уницкой вулканической зоны; 3 – габбро-долериты Викшезерского силла Уницкой вулканической зоны; 4 – габбро-долериты Заонежских силлов Уницкой вулканической зоны; 5 – базальтовые лавы Кондопожской вулканической зоны; 6 – базальтовые лавы оз. Хавчозеро Кондопожской вулканической зоны (по Г. А. Лебедевой, Ю. К. Калинину); 7 – габбро-долериты Кончезерского силла Кондопожской вулканической зоны; 8 – габбро-долериты Кондопожского силла Кондопожской вулканической зоны; 9 – габбро-долериты Мунозерских силлов Кондопожской вулканической зоны.

Таблица 1.2. Химические составы пород заонежской свиты

Элементы	Кремнистые породы	Карбонатные породы	Алевролиты, туфы, туффиты		Шунгиты нижнего продуктивного горизонта	Шунгиты среднего продуктивного горизонта
			I пачка	II пачка		
SiO_2	95,86	7,67	46,08–63,0	45,85–67,46	39,36	45,78
TiO	0,02	0,06	0,57–1,64	0,16–2,32	0,62	0,42
Al_2O_3	0,11	0,92	11,10–16,11	5,73–9,21	12,41	5,55
Fe_2O_3	0,10	0,60	0,62–8,84	3,16–12,67	3,38	3,22
FeO	0,97	1,08	1,91–13,20	Не опр.	Не опр.	Не опр.
MnO	0,013	0,32	0,03–0,19	0,02–0,14	0,05	0,03
MgO	0,37	5,04	2,52–10,52	1,57–9,92	3,23	1,00
CaO	Не опр.	45,38	0,28–10,31	0,14–8,27	0,62	0,14
Na_2O	0,10	0,02	1,81–6,02	0,08–3,71	4,67	0,35
K_2O	0,18	0,01	0,10–2,52	1,67–5,75	0,12	2,00
ппп	2,20	Не опр.	4,40–20,41	6,31–27,36	35,02	41,71
H_2O	0,30	0,06	0,05–0,60	0,17–0,70	0,68	1,02
$\text{C}_{\text{орг}}$					29,0	35,7

В целях изучения малых элементов, выяснения зависимости их концентрации от вещественного состава пород, установления их генетической природы, условий формирования и выявления горизонтов, перспективных на цветные металлы, были использованы полуколичественные и количественные спектральные анализы. В табл. 1.3 приведена группа рудогенных элементов, которые, по нашему мнению, наиболее информативны. Все перечисленные разновидности пород содержат незначительные концентрации рудогенных элементов, но наиболее низкие содержания отмечаются в карбонатных и кремнистых (лидито-подобных) породах. Однако, несмотря на это, наблюдается приуроченность тех или иных элементов к определенным разновидностям пород в той или иной структуре, что и позволяет говорить об их геохимической специализации.

Таблица 1.3. Содержание микроэлементов в углеродсодержащих породах заонежской свиты Карелии, г/т

Элемент	Кремнистые породы	Карбонатные породы	Алевриты, туфы, туффиты и их метаморфизованные разности		Нижний продуктивный горизонт
			I пачка	II пачка	
Cu	90	20	100	200	30
Co	80	30	80	40	20
Ni	86	20	140	300	100
Ti	440	500	7000	5000	3000
V	220	100	600	3000	100
Cr	120	300	400	300	300
Zn	70	17	–	700	–

Рудогенные элементы цветных металлов в углеродсодержащих породах присутствуют в основном в форме сульфидов. Следует заметить, что, несмотря на общую зараженность сульфидными породами заонежской свиты, наблюдается приуроченность рудного вещества к породам второй пачки, т. е. к шунгитистым туффитам. В зависимости от степени метаморфизма рудная минерализация относится к пиритовому типу, а рудное вещество находится в виде пирита или пирротина. Для фации зеленых сланцев характерно образование пирита с подчиненными количествами халькопирита, сфалерита и пирротина. Формы нахождения сульфидов разнообразны: слои, послойная вкрапленность, гнезда, конкреции, глобулы, рубашки вокруг обломков пород и минералов, жилки и прожилки. Среди оруденелых сланцев по условиям образования выделяются первично-осадочная и метаморфогенно-гидротермальная рудные минерализации.

В составе руд спектральным и химическим анализами отмечены Zn, Ni, Co, Cu, в меньших количествах – Ag, Mo, Pb, Au. Содержание цветных металлов в конкрециях и стяжениях увеличивается на порядок и выше против кон-

центрации их во вмещающих туффитах с послойной рудной вкрапленностью. Изучение сульфидной минерализации показало, что при вторичном перераспределении сульфидов в стадию эпигенеза и метаморфизма происходит концентрация Cu, Co, Ni, Zn, Pb, Ag, Au.

Пирротинная минерализация в углеродсодержащих породах Онежской мульды не характерна. Пирротин встречается только в том случае, если наблюдается перекристаллизация мелкозернистого пирита в прослои массивного пирита, а также в зонах тектонической активизации, в которых вместо шунгита образуется графитит, а пирит замещается пирротинном.

Источником рудного вещества в углеродсодержащих породах Карелии являются вулканические эманации трех фаз заонежского вулканизма. При фациальных и палеовулканологических построениях на территории Онежской мульды в области активного подводного вулканизма четко оконтурилась зона гидротермального поля наиболее активной второй фазы заонежского вулканизма. В разрезе заонежской свиты данная зона представлена шунгитовыми породами второго пласта среднего продуктивного горизонта и перекрывающими их шунгитистыми туффитами, которые, как указывалось, и являются наиболее перспективными для поисков цветных металлов. Связь процессов рудообразования с проявлениями вулканизма, пластовая форма рудных тел, сохранившиеся первичные структуры пород и руд, характер сульфидной минерализации и другие данные позволяют говорить об однотипности процессов рудообразования в черносланцевых образованиях заонежского комплекса и в аналогичных черносланцевых формациях Балтийского щита в целом (Голубев и др., 1984).

На геохимические особенности района несомненно сильное влияние оказывают зоны СРД (структурно-разрывных дислокаций), к которым приурочены месторождения комплексных Cu-U-Mo-V руд. В настоящее время выделено семь зон. В этих зонах отмечаются повышенные до аномальных содержания Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Mo, Bi, Au, Ag, Se, Pt, Pd и других элементов. Следует подчеркнуть, что процессы рудообразования, ведущими признаками которого служат проявления приразломного натриевого метасоматоза, слюдитизации и карбонитизации, а также перечисленный спектр аномальных концентраций элементов, контролируются осевыми разломами и зонами смятия в сочетании с пачками переслаивания контрастных по физико-механическим и геохимическим свойствам пород – доломитов, алевритов, сланцев, базальтов и габбро-долеритов. Детальная характеристика зон СРД приведена А. В. Булавиным в монографии «Металлогения Карелии» (1999).

С уран-благороднометалло-ванадиевой формацией зон СРД связываются наиболее перспективные для промышленного освоения

объекты. Месторождения и проявления этой рудной формации локализуются в пределах Космозерского, Падминского и Шульгиновского рудных полей Онежского рудного района Онежско-Белозерской минерагенической зоны. За последние десятилетия работами ГГП «Невскгеология» здесь были выявлены богатые, не имеющие мировых аналогов по содержаниям ванадия, комплексные *месторождения Средняя Падма, Царевское, Весеннее, Верхняя Падма, Космозеро* и целый ряд проявлений, локализованных в метасоматитах по углеродсодержащим алевролитам и сланцам основания заонежской свиты людиковийского надгоризонта (прил. 1). Суммарные запасы и прогнозные ресурсы пентоксида ванадия по всем месторождениям и проявлениям Онежского рудного района оценены в 556 тыс. т, большая их часть (балансовые запасы кат. С₁ + С₂ – 332,5 тыс. т), сосредоточенная в месторождениях Падминского и Космозерского рудных полей, относится к категории так называемых активных запасов (Коровкин и др., 2003).

Месторождение Средняя Падма расположено на Заонежском полуострове, в 17 км юго-западнее пос. Толвуя и открыто при проведении поисковых работ экспедицией № 32 ПГО «Невскгеология» (Петров, 1985ф). В дальнейшем на месторождении были проведены поисково-оценочные работы и предварительная разведка с подсчетом запасов комплексных уран-благороднометалльно-ванадиевых руд (Самойленко, 1992ф, 1994ф).

Месторождение (рис. 1.1) структурно приурочено к юго-западному крылу Падминской антиклинали, имеющей в пределах площади месторождения изометричную форму с крутинами (свыше 75°) углами падения крыльев. Основной рудоконтролирующей структурой на месторождении является крутопадающая зона межпластового срыва вдоль контакта доломитовой пачки туломозерской свиты ятулийского надгоризонта и пачки алевролитов заонежской свиты людиковийского надгоризонта. С зоной межпластового срыва сопряжены субперпендикулярные ей и напластованию пород пологие зоны трещин отрыва. Зоны трещин отрыва представляют собой линзовидные в плане и клиновидные в поперечном разрезе линейные штокверки, состоящие из кулисообразно расположенных сближенных трещин отрыва. Область развития зон трещин отрыва и ореолов развития предрудных и рудных метасоматитов выделена в продуктивную зону месторождения. В строении рудовмещающих ореолов метасоматитов наблюдается рудно-метасоматическая вертикально-фланговая зональность с закономерной сменой от внешних зон осветления пород через зоны альбититов и слюдисто-альбитовых метасоматитов к внутренним зонам слюдитов и слюдисто-карбонатных метасоматитов.

Все рудные тела месторождения, представляющие собой участки непрерывного развития

кондиционных ванадиевых руд, располагаются в пределах продуктивной зоны, они локализуются в пологих (0–20°) зонах трещин отрыва. Наиболее богатое оруденение связано с внутренними зонами метасоматитов. Всего на месторождении выделено 11 рудных тел. Рудные тела с относительно простой морфологией имеют слабоволнисто-линейное залегание с общим пологим падением на северо-запад в продольных разрезах и на северо-восток – в поперечных разрезах, расположены в разрезах ярусно с кулисообразным перекрытием на расстоянии 5–30 м. Все рудные тела вытянуты в северо-западном направлении и имеют соотношение ширины и длины 1 : 5–20. Глубина залегания рудных тел – от 55 до 310 м.

Основным компонентом руд является ванадий. Минеральный тип руд – настуран-роскоэлитовый, благороднометалльно-настуран-роскоэлитовый, сульфидно-настуран-роскоэлитовый. По структурно-текстурным особенностям локализации ванадиевого оруденения выделяются три основные разновидности руд: вкрапленная, массивная и жильная. Вкрапленные руды составляют в среднем 38%, массивные – 50%, жильные – 12% от общего объема кондиционных ванадиевых руд. Главными минералами, на которые приходится около 60% минерального состава руд, являются альбит и карбонаты, на долю слюды приходится 25%. Пентоксид ванадия на 90% содержится в слюдах (роскоэлит, ванадиевый флогопит), на 10% – в ванадиевом гематите, а также в оксидах, урано-ванадатах и других минералах (ноланите, карелианите, монтрозеите, карнотите, туюмуните). Среднее содержание V₂O₅ по месторождению составляет для категории запасов С₁ 2,78%, для С₂ – 1,97%.

Попутными полезными компонентами в комплексных рудах месторождения являются уран, золото, платина, палладий, молибден, серебро, медь. Кроме того, в рудной ассоциации с ними находятся селен, висмут, рений, олово, ниобий и др.

Урановое оруденение развито в контурах ванадиевых рудных тел и представлено вкрапленностью и прожилками уранинита, настурана, титанатов урана, вторичными силикатами и ванадатами урана. Уран-ванадиевые руды содержат в своем составе в среднем 0,074–0,061% урана. По содержанию урана руды являются низкосортными и как собственно урановые практического значения не имеют.

Медно-молибденовое оруденение присутствует в кондиционных ванадиевых рудах и, кроме того, отмечено за пределами контура подсчета запасов ванадиевых руд и может быть оконтурено в самостоятельные рудные тела. Оно ассоциирует с рением.

Золото и элементы платиновой группы тесно связаны с сульфидной минерализацией, проявленной обычно в участках развития гидротермальных кварцевых и кварцево-селенидных прожилков.

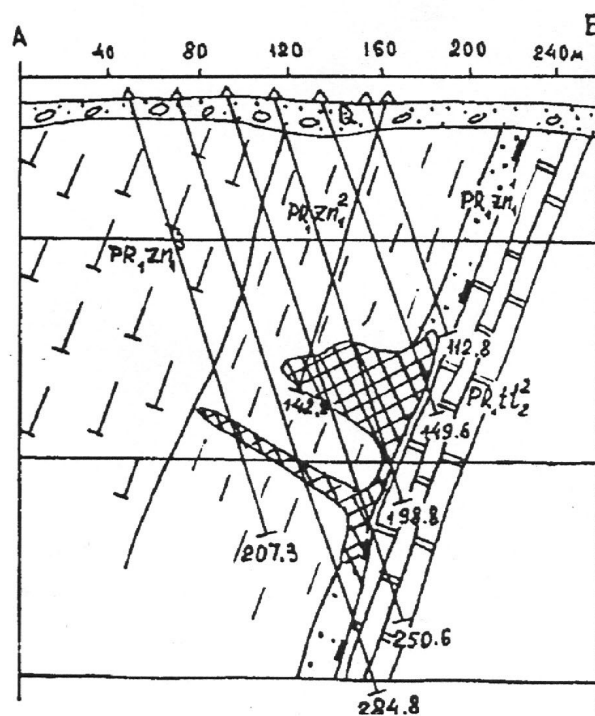
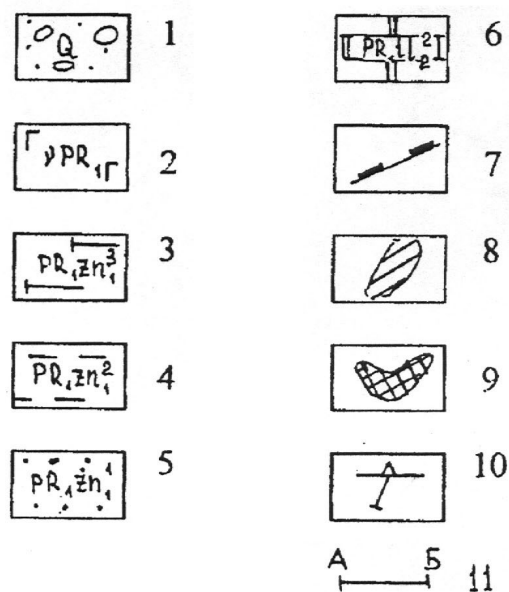
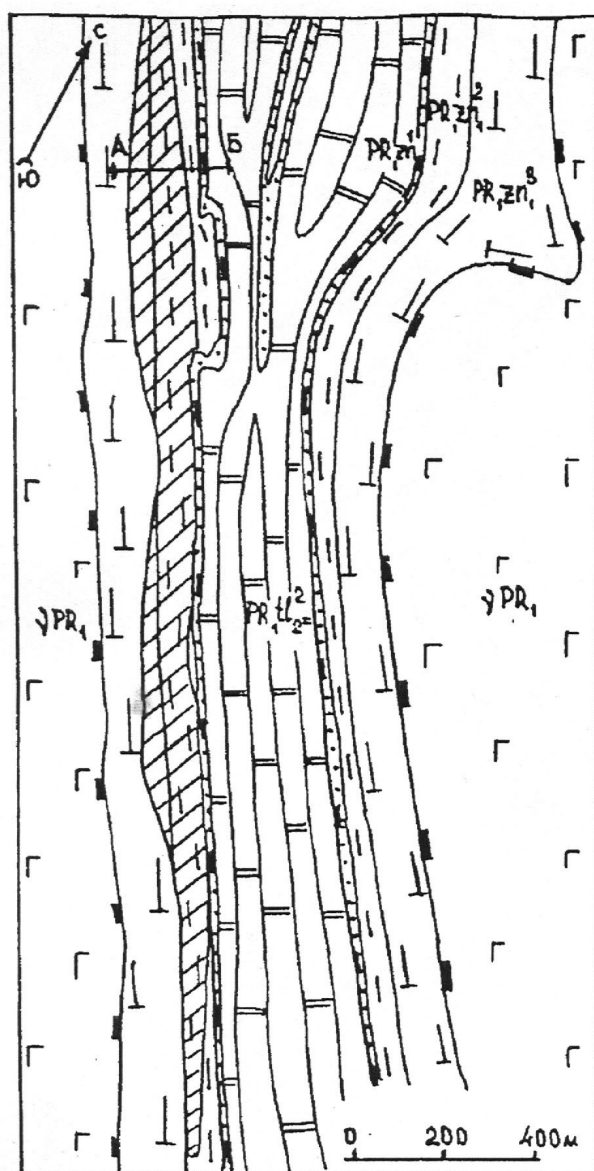


Рис. 1.1. Схема геологического строения месторождения комплексных уран-благороднометалло-ванадиевых руд Средняя Падма (Самойленко, 1992ф, 1994ф):

1 – четвертичные моренные валунно-галечные отложения; 2 – габбро-диабазы силлово-дайкового комплекса; людиковский надгоризонт, заонежская свита, нижняя подсвита, верхняя пачка; 3 – карбонатно-сланцевые сланцы с прослоями доломитов и алевролитов; средняя пачка; 4 – шунгитсодержащие сланцы (метапелиты), пелитоморфные доломиты; нижняя пачка; 5 – аркозовые алевролиты со слюисто-доломитовым цементом; ятулийский надгоризонт, туломозерская свита, верхняя подсвита, верхняя пачка; 6 – сероцветные песчаные кварцсодержащие доломиты; 7 – послойные срывы; 8 – проекции рудных залежей на горизонтальную поверхность; 9 – контуры уран-ванадиевых с благородной минерализацией рудных тел в разрезе; 10 – скважины в разрезе; 11 – линия геологического разреза

Запасы уран-ванадиевых руд по месторождению (табл. 1.4) подсчитаны до глубины 350 м. Запасы пентоксида ванадия по категории С₁ составляют 58,77 тыс. т и по категории С₂ – 48,88 тыс. т и соответствуют крупному месторождению. При подсчете запасов учитывались временные кондиции, утвержденные протоколом комиссии по запасам Геологического концерна «Геологоразведка» № 2 от 29.07.1994 г. В соответствии с кондициями бортовое содержание V₂O₅ принято равным 1,0%, минимальная мощность рудного тела – 2,0 м, максимальная мощность пустых пород и некондиционных руд в рудном пересечении – 4,0 м.

По данным лабораторных технологических исследований, проведенных в ВИМСе в 1989 и 1991 гг. и ВНИИХТе в 1990 г., разработаны два метода переработки уран-ванадиевых руд: химико-металлургический с предварительным магнитно-флотационным обогащением руды и гидрометаллургический (автоклавное сернокислое выщелачивание) с предварительным флотационным обогащением. При обоих методах получается сульфидный концентрат, черновой урановый концентрат и пентоксид вана-

дия. Извлечение ванадия при использовании химико-металлургического метода составляет 92,5%, урана – 91%, при использовании гидрометаллургического метода – более 80% и 74% соответственно. В первом случае конечным продуктом является химически чистый пентоксид ванадия, а во втором – чистый пентоксид ванадия. Извлечение в сульфидный концентрат попутных компонентов составляет: золота – 73%, палладия – 54%, серебра – 93%, меди – 95%, молибдена – 95%.

Горнотехнические условия освоения месторождения подземным способом средней сложности. Осложнения ожидаются при проходке шахт в зонах трещиноватости в условиях сильной их обводненности.

В процессе изучения месторождения Средняя Падма выполнен большой объем буровых, горных и опробовательских работ (табл. 1.5).

С учетом состава руд месторождения, содержащих в значительных концентрациях целый ряд опасных для живых организмов химических элементов (уран, ванадий, молибден, селен и другие), и размещения его в бассейне Онежского озера на площади Заонежского

Таблица 1.4. Кадастр месторождений и проявлений ванадиевых и ванадийсодержащих руд

Месторождение	Полезные ископаемые		Содержание V ₂ O ₅ , макс.; сред., %	Запасы руды по категориям, млн т		Прогнозные ресурсы руды кат. Р ₁ + Р ₂ , млн т	Степень промышленного освоения	Важнейшая литература
	основное	попутные		А + В + С ₁	С ₂			
Средняя Падма	Ванадий	Уран, золото, МПГ, молибден, серебро, медь	17,8; 2,35	2,112	2,478		Резерв	Самойленко, 1992ф, 1994ф
Верхняя Падма	Ванадий	Уран, золото, МПГ, медь, молибден, серебро	–; 2,32		0,565			Петров, 1991ф; Самойленко, 1992ф, 1994ф
Царевское	Ванадий	Уран, МПГ, медь, молибден, золото, серебро	14,8; 2,33		3,378			Петров, 1991ф; Самойленко, 1992ф, 1994ф
Космозеро	Ванадий	Уран, золото, МПГ, медь, молибден, серебро	16,2; 4,22		1,405	0,237		Петров, 1991ф; Самойленко, 1992ф, 1994ф
Весеннее	Ванадий	Уран, золото, МПГ, молибден, серебро, медь	–; 3,09		1,204	1,456		Петров, 1991ф; Самойленко, 1992ф

Таблица 1.5. Объемы основных видов работ, выполненных на месторождении Средняя Падма

№ п/п	Вид работ	Единица измерения	Объемы по стадиям		
			Поисково-оценочная (1985–1988 гг.)	Предварит. разведка (1989–1993 гг.)	Общий объем
1	Подземные горные выработки:				
	ствол шахты	м	–	155,0	155,0
	горизонтальные	м	–	1220,0	1220,0
2	Колонковое бурение, всего	м (скв.)	48174 (203)	16041 (113)	64215 (316)
	В т. ч. по видам: с поверхности		46375 (193)	11971 (91)	58346 (255)
	подземное		–	275 (11)	275 (11)
	гидрогеологическое		1799 (10)	2048 (13)	3847 (23)
	техническое		–	1747 (27)	1747 (27)
3	Опробование: керновое	м (проб)	4535 (5045)	2406 (2680)	6941 (7725)
	бороздвое	м (проб)	–	1315 (1484)	1315 (1484)
	литогеохимическое	проб	3630	860	4490
	валовое	проб	–	71	71
	технологическое	проб	1	11	13

полуострова с уникальными историко-культурными и природными комплексами, в процессе геологоразведочных работ при проходке буровых скважин, разведочной шахты и подземных горных выработок выполнен комплекс специальных мероприятий, направленный на предотвращение негативных экологических последствий. Мероприятия включали:

- радиометрическую сортировку добытой в процессе проходческих и буровых работ породы на рудную и пустую массы;

- складирование рудной массы (уран-ванадиевой руды) в объеме 5300 т (3000 м³) на бетонированной площадке склада-накопителя, построенного в соответствии с рабочим проектом, разработанным во ВНИПИпромтехнологии;

- складирование пустой породы в отвале около шахты;

- систематический контроль качества подземных и шахтных вод;

- химическую очистку шахтных вод от радионуклидов на подземной установке, созданной по рабочему проекту ВНИПИпромтехнологии: очищенные воды подавались в поверхностный отстойник, а уже отстоявшиеся воды по желобу-водоводу сбрасывались на рельеф и затем в р. Падму. В целях экономии чистой подземной воды осуществлялось обратное водоснабжение на производственно-технические нужды с подпиткой систем очищенными шахтными водами;

- бурение шпуров в подземных выработках с промывкой водой, позволившее исключить загрязнение воздуха пылью;

- очистку воздуха в забое перед поступлением в вентиляционный ствол путем создания водных оросительных систем для пылеподавления и растворения газов, образующихся при взрывных работах;

- консервацию руды в соответствии с рабочим проектом, составленным и согласованным Главным санитарным врачом Республики Карелия;

- «мокрую консервацию» разведочной шахты и подземных выработок после завершения геологоразведочных работ, закрытие устья ствола двумя бетонными перекрытиями и его засыпку;

- дезактивацию использовавшегося оборудования и материалов;

- ликвидационный тампонаж пробуренных скважин.

В связи с тем что промплощадка (около 3 га) разведочной шахты на месторождении Средняя Падма представляет собой безлюдную залесенную и заболоченную местность, ликвидационные работы на поверхности заключались в засыпке заболоченной площади песчано-галечным материалом из карьера и пустой породой из шахты, ее выравнивании бульдозером и рекультивации по лесохозяйственному направлению путем самозарастания.

После ликвидации шахты и консервации руды на всей площади рекультивированных земель выполнена детальная радиометрическая съемка, подтвердившая отсутствие на ней участков радиоактивного загрязнения. Как показали более поздние исследования (см. ниже), такие участки отсутствуют и спустя 10 лет после завершения работ на месторождении Средняя Падма, несмотря на то, что значительные объемы добытой урансодержащей руды законсервированы на поверхности.

Месторождение Царевское расположено в южной части Заонежского полуострова, в 12 км севернее д. Типиницы. На месторождении проведены поисковые (Петров, 1988ф) и оценочные работы (Петров, 1991ф), выполнен подсчет запасов комплексных руд (Самойленко, 1992ф, 1994ф).

Структурно месторождение приурочено к юго-западному крылу Западно-Царевской антиклинали, являющейся юго-восточным продолжением Падминской антиклинали.

Оруденение локализовано в шунгитсодержащих алевролитах и метапелитах нижней подсвиты заонежской свиты, являющихся своеобразным литолого-геохимическим барьером на контакте с подстилающими пестроцветными доломитами туломозерской свиты ятулия. Рудная минерализация по поперечным клиновидным зонам дробления прослеживается и в вышележащие сланцы. Выделяются две субгоризонтальные рудные залежи, на глубине 400 м сливающиеся вместе. Залежь 1 имеет длину 1,3 км, ширину по падению 200–300 м, среднюю мощность 9 м; залежь 2 – соответственно 0,3 км, 50–100 м, 12 м.

Руды месторождения представлены слюдиристо-альбит-доломитовыми метасоматитами существенно карбонатного состава (сумма карбонатов в среднем составляет 20% от массы породы). Текстура руд прожилково-вкрапленная, дисперсная, реже массивная. Характерна наложенная хлорит-кварц-сульфидная минерализация. Главным промышленным минералом является ванадиевый флогопит (роскоэлит), образующий мелкокрапленные выделения и сплошные мелкочешуйчатые массы, присутствующий в гнездах, цементе или обломочном материале брекчий в ассоциации с доломитом, ванадиевым гематитом и карелианитом. Урановая минерализация, развитая в виде колломорфной мелкой вкрапленности в слюдитах и секущих их кварц-карбонатных жилах, представлена настураном, уранинитом, браннеритом; молибденовая – молибденитом; меднорудная – халькозином, халькопиритом и борнитом; золоторудная – самородным золотом; золото и палладий связаны с сульфидами меди и селенидами свинца, висмута и серебра. Технологические свойства руд Царевского месторождения не определялись.

Месторождение Весеннее расположено на Заонежском полуострове в 6 км северо-

западнее д. Великая Нива. Находится на расстоянии 0,6–0,8 км от месторождения Средняя Падма и может рассматриваться как западный фланг этого объекта. Состояние изученности месторождения соответствует оценочной стадии (Петров, 1991ф; Самойленко, 1992ф).

Месторождение располагается в замковой части и в крутом северо-восточном крыле Саврозерской антиклинали центральной части Тамбицкой зоны СРД. Оруденение представлено тремя рудными залежами, локализованными в крыле и шарнире пликтивной тектонической структуры, и контролируется слоем шунгитсодержащих алевролитов и клиновидной зоной дробления. Общая протяженность рудной зоны – 2,5 км, ширина – от 30–40 до 90 м. Залежь 1 в северо-восточном крыле структуры имеет протяженность 600 м, ширину – 50–60 м, мощность – от 1,5 до 29,6 м (средняя – 9 м). Рудная залежь 2, расположенная в 200 м к югу от залежи 1 в замковой части антиклинали, имеет протяженность 800 м, ширину – 40–66 м, мощность – от 1,1 до 20,0 м (средняя – 8,9 м). Залежь 3 расположена в 200 м к северу от залежи 1 в замке складки, ее протяженность – 560 м, ширина – 40–60 м, мощность – от 1,3 до 33 м (средняя – 8,2 м).

Руды сложены брекчиями на кварц-доломитовом цементе, метасоматитами слюдисто-кварц-карбонатного состава (1-я стадия рудного процесса) и карбонатными прожилками с сульфидной минерализацией (2-я стадия рудного процесса). Основная составляющая комплексных руд месторождения – ванадийсодержащие минералы роскоэлит, акмит и карелианит; урановая минерализация представлена настураном, уранинитом, коффинитом. Руды по составу более бедные, чем в месторождении Средняя Падма, однако сопровождаются сопутствующей минерализацией, ведущее значение среди которой имеют молибденовая и золотая.

Месторождение Верхняя Падма находится в 5 км юго-восточнее месторождения Средняя Падма. На месторождении проведены поисковые (Петров, 1988ф) и оценочные (Петров, 1991ф) работы. Структурно месторождение располагается в Тамбицкой зоне СРД и приурочено к синклинальной складке, усложняющей замковую часть Падминской антиклинали.

Оруденение локализовано в шунгитсодержащих алевролитах заонежской свиты людиковия на их контакте с подстилающими доломитами туломозерской свиты ятулия, а также в межслойной зоне дробления карбонатных пород. Представляет собой единую рудную зону протяженностью 1,2 км, включающую две стратиформные рудные залежи седловидной формы. Верхняя рудная залежь 1, залегающая на глубинах от 20 до 100 м от поверхности, прослежена по простиранию на 1,17 км при ширине 30–40 м и мощности 4 м. Рудная залежь 2, располагающаяся стратиграфически ниже

первой, имеет длину 0,6 км, ширину – 100 м, мощность – 3 м. Большая часть запасов (8,8 тыс. т пентоксида ванадия) сосредоточена в рудной залежи 1.

Состав руд существенно карбонатный. Руды залежи 1 представлены доломит-слюдисто-альбитовыми метасоматитами по алевролитам, залежи 2 – кварц-доломит-слюдистыми метасоматитами по карбонатным породам. Из рудных минералов преобладают ванадиевый флогопит и ванадаты урана (карнотит, тюмунит) в ассоциации с настураном. Карнотитовая минерализация частично распространяется и в тектонизированные доломиты туломозерской свиты. Для руд, наряду с высокими содержаниями пентоксида ванадия и урана, характерны повышенные содержания меди и молибдена, а также аномальные содержания сопутствующих золота, серебра, висмута и лития. Сведения о запасах руды приведены в соответствии с подсчетом, выполненным по результатам оценки месторождения (Самойленко, 1994ф).

Месторождение Космозеро, принадлежащее к группе месторождений и проявлений Святухинско-Космозерской зоны СРД, расположено в 4,5 км севернее пос. Великая Губа, в 14 км к юго-западу от месторождения Средняя Падма. Открыто в 1979 г. при проведении поисково-картировочных работ на уран (Петров, 1981ф), сначала изучалось как урановое (Петров, 1985ф), а затем было переоценено как ванадиевое (Петров, 1991ф).

Структурно месторождение приурочено к Космозерской антиклинали и расположено на ее запрокинутом юго-западном крыле, в замковой части и на северо-восточном крыле в структурных ловушках – складчатых нарушениях, изгибах пластов, крутопадающих разломах – в шунгитсодержащих метаалевролитах и метапелитах заонежской свиты людиковия.

Комплексное уран-ванадиевое оруденение образует четыре рудные залежи I, IIa, IIb и III со средними размерами по простиранию от 100 до 700 м, по падению от 30 до 127 м, мощностью от 9 до 28 м. Глубина залегания рудных залежей варьирует от 50 м до 500 м. Большая часть запасов руды (67%) сосредоточена в залежи III. Рудные залежи имеют сложное внутреннее строение штокверкового типа и состоят из серии невыдержанных по залеганию и мощности рудных тел. Характер метасоматической зональности, контролирующей оруденение, сходен с наблюдаемым на месторождении Средняя Падма.

Рудами являются доломит-слюдисто-альбитовые метасоматиты по сланцам, алевролитам и доломитам. По текстурно-структурным особенностям руды прожилково-вкрапленные, дисперсные, реже – массивные, обычно мелкозернистые (менее 1,0 мм), редко среднезернистые (до нескольких миллиметров). Характерна

наложенная сульфидная минерализация (пирит, халькопирит, молибденит, сфалерит).

Главными промышленными минералами ванадия являются ванадиевый флогопит и карелианит; урана – настуран, титанаты и уранованадаты урана; молибдена – молибденит, тугариновит; меди – халькопирит, халькозин, самородная медь; золота – самородное золото, селениды и интерметаллические соединения золота и серебра; платины и палладия – селениды свинца, висмута и серебра. Перечень геохимических спутников основного оруденения тот же, что и в рудах месторождения Средняя Падма. Подсчет запасов по месторождению произведен до глубины 500 м (Самойленко, 1994ф).

Проявление Шульгиновское расположено на юго-западном берегу оз. Верхнее Пигмозеро, в 6 км от д. Уница. Наличие здесь, в пределах Пигмозерской зоны СРД, проявления с промышленными содержаниями ванадия и урана послужило основанием для выделения Шульгиновского рудного поля. Проявление на участке Пигмозеро было выявлено при проведении поисковых работ (Петров, 1987ф), в 1998–2003 гг. оно изучалось в ходе прогнозно-поисковых работ на Лижемско-Повенецкой площади (Пичугин, 2003ф).

Проявление включает две рудные зоны: Пигмозерскую (западную) и Диановогорскую (восточную), которые структурно приурочены к крутопадающим крыльям одноименных антиклиналей. В пределах каждой из этих зон выделено по одной рудной залежи. Пигмозерская залежь прослеживается по простиранию на 2,4 км, размеры Диановогорской залежи не установлены, известно только, что она залегает в ядре антиклинали и имеет седловидную форму, аналогичную залежи 2 месторождения Весеннее.

Для обеих рудных залежей характерно размещение оруденения в алевролитах заонежской свиты, а также по системе пологих клиновидных нарушений в шунгитсодержащих сланцах, сопряженных с послойной зоной дробления на нескольких гипсометрических уровнях.

Уран-ванадиевые руды представляют собой метасоматиты, в составе которых участвуют ванадиевые слюды, гематит, карбонаты и рудные минералы, телескопированные на пиритсодержащие альбититы. Богатые руды слюдитового и кварц-слюдисто-карбонатного состава представлены гнездовым, жильным и брекчиевидным морфологическими типами, бедные и убогие руды обычно мелкокрапленые. Широко проявлена вкрапленная и гнездовая сульфидная минерализация. Прогнозные ресурсы при бортовом содержании пентоксида ванадия 1% Пигмозерской залежи оценены по категории P_1 , Диановогорской – по категории P_2 (Пичугин, 2003ф).

Признаками зон СРД, наиболее четко проявленными на уровне нижней подсвиты заонежской свиты, являются: морфологические особенности складок, наличие щелочно-карбонатного метасоматоза, уран-ванадиевой и медно-сульфидной минерализации, линейных магнитных аномалий и минимумов силы тяжести. Вверх по разрезу такие признаки ослабевают, а в нижележащих образованиях вообще исчезают как в разрезе, так и в плане.

Литература

- Голубев А. И., Светов А. П., 1983. Геохимия базальтов платформенного вулканизма Карелии. Петрозаводск: Карелия. 191 с.
- Голубев А. И., Ахмедов А. М., Галдобина Л. П., 1984. Геохимия черносланцевых комплексов нижнего протерозоя Карело-Кольского региона. Л.: Наука. 192 с.
- Коровкин В. А., Турылева Л. В., Руденко Д. Г. и др., 2003. Недра северо-запада Российской Федерации. СПб.: ВСЕГЕИ. 520 с.
- Макарихин В. В., Кононова Г. М., 1983. Фитолиты нижнего протерозоя Карелии. Л.: Наука. 208 с.
- Металлогения Карелии, 1999. Отв. ред. С. И. Рыбаков, А. И. Голубев. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 340 с.
- Полеховский Ю. С., Голубев А. И., 1989. Людиловский надгоризонт Онежского прогиба // Проблемы стратиграфии нижнего протерозоя Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 106–117.

Глава 2

ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ЗАОНЕЖЬЯ

И. Н. ДЕМИДОВ

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Четвертичные отложения Заонежского полуострова прерывистым чехлом перекрывают породы докембрия и изменяются по мощности от 0,5 до 20 м, при средних значениях только 3–5 м. В строении четвертичного покрова преобладают ледниковые, флювиогляциальные и озерно-ледниковые образования последнего Скандинавского поздневалдайского оледенения. Более молодые голоценовые болотные, озерные, аллювиальные и сейсмо-гравитационные отложения развиты локально.

Формирование различных типов четвертичных отложений, их минерально-химического и гранулярного составов зависело от условий осадконакопления, а также от состава и рельефа коренных пород.

В районе месторождения Средняя Падма морена перекрыта озерно-ледниковыми глинами, которые формировались одновременно с песчано-гравийной флювиогляциальной дельтой, расположенной к северу от месторождения.

I. N. DEMIDOV. THE QUATERNARY DEPOSITS OF THE ZAONEZHISKY PENINSULA

The Quaternary deposits of Zaonezhsky peninsula overlies on Precambrian bedrock by discontinuous cover and varies in thickness from 0.5 to 20 m but the average thickness is 3-5 m only. The glacial, glacialfluvial and lacustrine glacial sediments that formed during the last Scandinavian Late Valdyan (Weichselian) glaciation dominate in the Quaternary cover. Younger Holocene lacustrine, fluvial, seismic-gravitational and peat deposits locally spread in this area too.

The formation of the different types of Quaternary sediments and their mineral-chemical and granular composition were influenced by sedimentation factors as the composition and relief of bedrock.

At the Middle Padma area the till is overlain by lacustrine glacial clays, which were formed together with big sandy-gravel glacialfluvial delta located some northward from this area.

Ключевые слова: четвертичные отложения, Заонежский полуостров.

Строению и формированию четвертичных отложений Заонежского полуострова посвящена обширная литература (Бискэ и др., 1971; Лукашов, Ильин, 1993; Демидов, Лаврова, 2000). Поэтому лишь кратко остановимся на основных особенностях и закономерностях площадного распространения и вещественного состава различных генетических типов четвертичных отложений.

Четвертичные отложения Заонежского полуострова представлены главным образом ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями Скандинавского ледникового покрова поздневалдайского оледенения, прерывистым

чехлом перекрывающими скальные породы докембрия (прил. 2). Подчиненное развитие имеют болотные, озерные, сейсмо-гравитационные и аллювиальные осадки голоцена. Более древние отложения четвертичного периода в настоящее время на территории неизвестны, хотя, учитывая значительные, более 100 м, перепады высот земной поверхности, можно предположить, что они могли сохраниться от ледниковой эрозии в глубоких и узких котловинах сельгового рельефа, занятых в настоящее время многочисленными озерами и заливами.

Особенности площадного распространения, гранулярный, петрографо-минеральный

и химический составы различных генетических типов четвертичных отложений, их физико-механические и водные свойства зависят от вещественного состава коренных пород региона, их рельефа (см. прил. 2), особенностей осадконакопления в поздне- и послеледниковое время.

Ледниковые отложения представлены песчаными, реже супесчаными, обычно сильно завалуненными основными донными моренами, сформировавшимися под основанием движущегося ледника в ходе деградации Онежской лопасти Скандинавского ледникового покрова в первой половине теплого интерстадиала аллеред, примерно 11,8–11,5 тыс. лет назад. Морены развиты почти повсеместно и слагают полого-холмистую, местами друмлинизированную равнину на востоке полуострова, практически сплошным чехлом перекрывающую докембрийские образования. Мощность моренного пласта достигает здесь 10–12 м при средних значениях 3–6 м и зависит главным образом от рельефа коренных пород. В центральной части полуострова, на водоразделе губы Святуха и оз. Путкозеро, моренный покров имеет мозаичный характер. Он лишь слегка нивелирует доледниковый рельеф, а его мощность изменяется от десятков сантиметров до 3–5 м. Морена залегает на докембрийских породах, часто сильно выветрелых или трещиноватых. Поверхность широко распространенных в регионе габбро-долеритов нередко разбита многочисленными трещинами на глубину 3–5 м и более. Горные породы практически лишены монолитности и представляют собой так называемую «разборную» скалу – скопление неокатанных разноразмерных блоков (Демидов, 1993а). Формирование такой «разборной» скалы можно связать как с процессами выветривания, так и с их разрушением в тектонических зонах дробления, приуроченных к широко развитым на полуострове омоложенным в неоген-четвертичное время разломам. Прочностные характеристики, в том числе и устойчивость к ледниковой экзарации, у таких пород в десятки и сотни раз меньше, чем у монолитных габбро-долеритов. Как правило, морены, развитые на такой «разборной» скале, характеризуются грубообломочным составом и сложены практически только обломками местных пород.

По строению моренный покров Заонежья можно подразделить на два типа. В первом содержание грубообломочных фракций (>1 см) составляет 40–50% и более. В их составе преобладают разноразмерные обломки местных пород – габбро-долеритов, карбонатных пород и различных сланцев (Бискэ и др., 1971; Демидов, 1993а). Как правило, данный тип морены встречается в условиях пересеченного рельефа коренных пород, зонах распространения слабоустойчивых к ледниковой экзарации трещиноватых или выветрелых габбро-долеритов или сланцев. Эти отложения являются локаль-

ными моренами, сформировавшимися за счет разрушения и ближнего переотложения местных коренных пород, на которых они и залегают. Часто до 85–90% грубообломочного материала представлено в этих моренах местными породами. Дальность ледниковой транспортировки колебалась от сотен метров до первых километров.

Другой тип морен – сланцеватая морена, содержащая 25–40% грубообломочных фракций, значительная часть которых (до 40% на севере полуострова и до 12% на юге) представлена обломками гранитов, гранито-гнейсов и других горных пород, принесенных ледником с Онего-Сегозерского водораздела. Залегают данные морены или на коренных породах, или на локальных грубообломочных моренах. В песчаных фракциях наблюдается преобладание кварца над полевыми шпатами. В целом отложения более отсортированы, чем первый тип морены. Дальность ледниковой транспортировки обломочного материала составляла первые десятки километров. На такое расстояние переносилось до 25–35% обломков. В целом петрографо-минеральный и химический составы морен хорошо отражают состав подстилающих коренных пород, за счет разрушения которых они сформировались (табл. 2.1, 2.2).

Несмотря на песчаный и супесчаный состав, морены обладают низкими фильтрационными свойствами, что часто ведет к заболачиванию территорий.

Флювиогляциальные отложения представлены хорошо отсортированными песчано-гравийно-галечными и песчаными осадками, слагающими озовые гряды, флювиогляциальные дельты и конуса выноса, фиксирующие положение магистральных систем стока талых ледниковых вод, а также уровни приледниковых бассейнов в ходе дегляциации территории. Иногда флювиогляциальные отложения дислоцированы, смяты в складки последующими подвижками ледникового края. В ходе отступления ледникового края с территории полуострова в теплый интерстадиал аллеред пересеченный рельеф коренных пород, а также относительно теплый климат интерстадиала способствовали формированию многочисленных туннелей и трещин в теле ледника, по которым и проходил сброс талых вод в приледниковое Онежское озеро. В основном, эти системы стока приспосабливались к понижениям сельгового рельефа. При формировании озовых гряд преобладал турбулентный режим течения потока. Его скорость в русловой части превышала 4–5 м/с. В этих условиях формировались мощные пачки хорошо окатанных галечников и валунов, практически лишенные мелкопесчаного материала. В латеральных частях потока, как правило, скорости течения были меньше и формировались песчаные и гравийно-песчаные отложения. На месте впадения системы

Таблица 2.1. Химический состав четвертичных отложений Заонежского полуострова

№	n	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	ппп
1	18	75,8	0,4	11,3	1,32	1,37	0,044	1,17	2,41	3,16	1,78	1,2
2	7	66,7	0,77	12,1	3,85	2,7	0,055	2,99	2,41	2,9	1,7	3,7
3	3	67,4	0,67	12,3	3,83	2,2	0,045	2,02	2,01	3,68	2,05	4,7
4	1	57,4	0,24	5,86	3,3	0,94	0,027	9,24	10,1	0,72	0,77	10,8
5	8	59,5	0,72	16,8	4,32	2,36	0,094	3,71	2,48	2,96	3,41	3,45
6	4	58,9	0,57	12,5	3,28	0,98	0,09	5,83	4,00	2,67	2,7	7,6
7	2	59,0	0,97	10,1	7,13	1,61	0,098	5,1	3,45	1,12	2,05	8,0
8	6	60,1	0,69	15,8	3,86	2,7	0,099	4,06	2,22	2,9	3,22	4,2
9	1	73,1	0,39	10,8	2,26	1,19	0,036	1,4	1,88	2,88	1,74	1,4
10	1	54,3	0,2	7,65	2,23	0,4	0,11	7,56	9,72	1,94	1,89	14,0
11		37–55,5		5,87–12,0	5,0–16,9	3,5–5,3	0,2–2,36	1,0–1,57	1,33–2,27			9,55–20,1
12		8,6–18,3		1,1–4,79	2,71–21,9	10,4–27,4	0,16–0,95	0,76–1,69	0,4–1,05			33,6–59,9

Примечание. n – количество проб. Морены: 1 – на гранитоидах Западной Карелии (дано для сравнения), 2 – на заонежских габбро-долеритах, 3 – на шунгитах, 4 – на карбонатах. Ленточные глины: 5 – на габбро-долеритах, 6 – на карбонатах, 7 – на шунгитах; 8 – гомогенные озерные алевроиты на габбро-долеритах; флювиогляциальные пески: 9 – на шунгитах (Ванчозеро), 10 – на карбонатах (Падмозеро); сапропели: 10 – черные сапропели с высоким содержанием силикатно-коллоидного комплекса, 11 – черные сапропели с повышенным содержанием органического вещества.

Таблица 2.2. Содержание микроэлементов (% N × 0,0001) в четвертичных отложениях

	Pb	V	Cu	Zn	Co	Ni	Sr	U	Tr	Ag
1	0–22 10	40–100 50	10–32 15			15–46 28	320–680 460			
2	0–46 17	100–320 150	46–320 100	60–320 70	10–46 25	46–320 60	150–320 200			
3	5–20 17	20–150 70	30–70 40	40–500 150	15–40 30	30–70 60	140–295 230	1,5–6,25 3,2	7–23 13	0,05

Примечание. 1 – морены Западной Карелии (n = 11) (дано для сравнения), 2 – морены Заонежского п-ова (n = 22), 3 – ленточные глины Заонежского п-ова (n = 32). В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – усредненные значения; n – количество анализов; 1, 2 – результаты полуколичественного спектрального анализа, Институт геологии КарНЦ, 3 – результаты спектрального анализа, ВСЕГЕИ.

стока талых вод в приледниковый водоем образовались флювиогляциальные дельты, сложенные преимущественно гравийно-песчаным материалом.

Флювиогляциальные отложения залегают на морене или непосредственно на коренных породах. Их мощность в среднем составляет 10–15 м. Благодаря гранулярному составу флювиогляциальные отложения обладают хорошими фильтрационными свойствами и являются коллекторами подземных вод. Коэффициенты фильтрации во флювиогляциальных осадках достигают сотен метров в сутки. Как правило, верхняя часть озовых гряд и флювиогляциальных дельт сдренирована. Наиболее протяженная система озовых гряд и флювиогляциальных дельт пролегает в западной части полуострова от восточного берега Кефтьень губы у д. Есино до Великой Губы и далее через острова Кижы и Керкостров до урочища Конда на южном побережье Большого Клименецкого острова (см. прил. 2; Демидов, Лаврова, 2000). Длина ее составляет около 85 км, ширина до 150 м, высота до 15 м. Другая система протягивается вдоль Уницкой губы от пос. Уница на севере до урочища Пески на юге. Восточнее Святогубско-Путкозерского водораздела располагаются три мощные системы озовых гряд и дельт. Наиболее протяженная пересекает Заонежский полуостров от мыса Ажепнаволоок на севере через озера Падмозеро и Керацкое до

пос. Типиницы на юге полуострова. В состав этой системы кроме озовых гряд входят флювиогляциальные дельты на полуострове Ажепнаволоок, на северном и на южном берегах оз. Падмозеро, у урочища Федькино (севернее месторождения Средняя Федьма), у д. Поля и у пос. Типиницы. Площадь этих дельт колеблется от 1,5 км² (Федькино) до 6 км² (на севере Падмозера).

Другая флювиогляциальная система начинается у южного берега оз. Путкозеро и соединяется с Падмозерской системой в районе оз. Керацкого. Третья система протягивается от устья р. Падмозерки в юго-восточном направлении через Толвуйский Бор к д. Ганьковская и д. Кузаранда.

Петрографо-минеральный состав флювиогляциальных отложений также отражает состав коренных пород и морен, за счет которых они образовались. Например, содержание обломков местных карбонатных пород в падмозерской дельте достигает 34%, а содержание шунгитовых сланцев в ванчозерской дельте – 39%.

Озерно-ледниковые отложения широко распространены на рассматриваемой территории и являются осадками Онежского приледникового озера. В ходе таяния последнего ледникового покрова, неравномерного гляциоизостатического компенсационного поднятия земной коры большая часть полуострова была затоплена водами Онежского приледникового

озера. На севере полуострова уровень водоема достигал современных отметок 110–120 м, на юге – около 80–90 м.

Отложения Онежского приледникового озера представлены сезонно-слоистыми ленточными глинами и песчано-алевритовыми осадками. Ленточные глины обычно встречаются на абсолютных отметках ниже 50–60 м, в понижениях рельефа, где они сохранились от последующего размыва в ходе стадийного падения уровня Онежского озера в поздне- и послеледниковые. В некоторых озерах (оз. Исаево) кровля ленточных глин располагается на высоте 80 м (Демидов, Красильников, 1997). Залегают глины, как правило, на морене и часто приурочены к дистальным частям флювиогляциальных дельт. Мощность их изменяется от десятков сантиметров до 7–10 м («Глиняное болото» около д. Бор Пуданцев, руч. Калей восточнее пос. Толвуя). Выдержанные пласты ленточных глин площадью более 1–2 км² кроме названных мест известны к северу от пос. Великая Губа, в районе оз. Керацкого, д. Кузаранда, д. Типиницы, а также на дне практически всех крупных озер Заонежского полуострова. Глины обладают низкими фильтрационными свойствами, являясь водупором и способствуют заболачиванию территории.

В минеральном составе глин кроме кварца, полевых шпатов и амфиболов присутствуют слюды, хлориты, а в качестве примесей – смешанослойные минералы (Демидов, Красильников, 1997). Химический состав ленточных глин зависит от состава коренных пород и развитых на них морен, а также от рельефа коренных пород, влиявшего на направление стока талых вод в приледниковые бассейны (табл. 2.1–2.3; Демидов, 1993б).

Озерные отложения представлены песками, супесями и галечниками, распространены по побережью Онежского озера до абс. отметок 50–60 м и слагают небольшие по протяженности пляжи, аккумулятивные террасы (Ажепнаволоок, Клим-Нос, урочище Пески), береговые валы (Южный Олений остров, Ламбасручей). Небольшие пляжи наблюдаются и на озерах Заонежья, берега которых были сложены более древними водно-ледниковыми песчано-гравийными отложениями (Ладмозеро, Ванчозеро, Падмозеро и др.).

Донные отложения многочисленных озер и заливов Заонежья, как правило, имеют следующее строение. На озерно-ледниковых ленточных глинах залегают однородные серые алевриты мощностью до 3 м, перекрывающиеся толщей сапропелей, иногда диатомитов. Мощность органических сапропелей достигает 3–4 м (Нижнее Мягрозеро, Ганьковское). Часто в озерах наблюдается и озерная железная руда – лимонит.

Сейсмоаллювиальные отложения Заонежья представлены грубообломочными осыпями и обвалами, сформировавшимися в ходе

последледниковых землетрясений. Они имеют ограниченное распространение и тяготеют к крупным обрывам тектонического происхождения (гора Зимняя, гора Сыпун, гора Городок). Протяженность сейсмообвалов иногда достигает 2 км при ширине до 100 м и мощности до 10 м (Лукашов, 1993).

Аллювиальные отложения вследствие молодости и неразработанности речной сети Заонежья представлены главным образом грубообломочной песчано-галечной фацией руслового аллювия.

Рассмотрим строение четвертичного покрова восточной части полуострова вдоль водной системы р. Падма – Падмозеро – р. Падмозерка – Онежское озеро. Восточная часть полуострова представляет собой моренную пологую холмистую, местами друмлинизированную равнину. Мощность морены достигает здесь 6–12 м. Река Падма протекает по слабо выраженному в современном рельефе межсельговому понижению субмеридионального простирания. Верховья реки располагаются на абсолютных отметках 64–65 м, ее устье (оз. Падмозеро) – 43,2 м. К этому межсельговому понижению была приурочена и мощная система сброса талых ледниковых вод во время дегляциации территории. Флювиогляциальная дельта площадью около 1,5 км², сложенная песчано-гравийно-галечными отложениями мощностью около 13–15 м, располагается в районе урочища Федькино, в 600–700 м севернее месторождения Средняя Падма. В районе месторождения морена перекрыта озерно-ледниковыми глинами, их образование связано с этой дельтой, через которую шел сброс талых вод в приледниковый бассейн. Уровень приледникового водоема, судя по абсолютной отметке дельты (85 м), составлял не менее 90 м. По мере отступления ледникового края на север формировались и другие дельты – в урочище Пески – д. Тявзия на юго-западном берегу оз. Падмозеро, а затем мощная дельта на северном берегу Падмозера. Позднее, по мере падения уровня Онежского озера в поздне- и послеледниковые, ленточные глины были частью размывы и сохранились только в понижениях рельефа. В долине р. Падмы они встречаются практически повсеместно и залегают на морене.

В юго-западной части оз. Падмозеро, у д. Тявзия, на дне озера скважиной вскрыт следующий разрез: 0–3 м – вода, 3–4 м – серовато-коричневый сапропель, 4–6 м – серые однородные алевриты с редкими песчаными прослоями, 6,0–6,45 м – серые микрослоистые ленточные глины, 6,45–6,7 м – розовато-коричневые ленточные глины, 6,7–8,0 м – серые ленточные глины. Примерно в 3 км к ССЗ у д. Белохино на дне Падмозера в строении донных осадков принимают участие следующие отложения: 0–3 м – вода, 3,0–4,75 м – однородные серые алевриты, 4,75–6,05 м – серые ленточные глины с розовато-коричневым горизонтом

на глубине 4,9–5,1 м, 6,05–8,60 м – розовато-серые карбонатсодержащие ленточные глины. В северной, наиболее глубокой части Падмозера вскрыт следующий разрез: 10,0–11,2 м – темно-серый ил с коричневатым оттенком, 11,2–12,4 м – однородные зеленовато-серые алевроиты с органикой, 12,4–15,5 м – серые однородные алевроиты с прослойками песка, 15,5–15,6 м – розовато-коричневые ленточные глины, 15,6–16,4 м – серые ленточные глины, 16,4–17,6 м – розовато-серые карбонатсодержащие ленточные глины (Демидов, 1993б). Химический состав глин представлен в табл. 2.3.

Исток оз. Падмозеро – р. Падмозерка – прорезает песчаные и песчано-гравийные отложения дистальной части падмозерской дельты, а также песчаные голоценовые осадки Онежского озера. Местами в долине р. Падмозерки наблюдаются выходы морены, перекрытые озерными и флювиогляциальными песчаными отложениями.

Геохимия четвертичных отложений. В зависимости от особенностей ледникового и водно-ледникового осадконакопления на территории полуострова сформировались различные по гранулярному составу, водным и физико-механическим свойствам отложения – грубообломочные пески и супеси (морены), хорошо дренируемые песчано-гравийно-галечные флювиогляциальные отложения озов и дельт и озерно-ледниковые глины и алевроиты. Вследствие широкого распространения на территории полуострова слабоустойчивых к ледниковой экзарации трещиноватых и выветрелых габбро-долеритов, шунгитовых, кварц-альбитовых и прочих сланцев ледник в ходе своего движения интенсивно эродировал подстилающие породы и формировал локальные морены за счет ближнего переотложения разноразмерных обломков местных пород. Поэтому петрографо-минеральный и химический составы морен сильно изменяются в зависимости от состава подстилающих докембрийских пород – габбро-долеритов, шунгитов, карбонатов (см. табл. 2.1–2.3).

В результате перемыва мореносодержащего льда тальными ледниковыми водами сформировался комплекс водно-ледниковых осадков – флювиогляциальных песчано-гравийных отложений, озерно-ледниковых ленточных глин и песков. Их состав также отражает состав как локальных морен, так и докембрийских пород, за счет которых они образовались. Химический состав отложений меняется не только по латерали разреза, но и по его вертикали. Наиболее интересным и представительным в этом отношении является сводный разрез ленточных глин, вскрытых скважинами на дне залива Фоймогуба в южной части оз. Путкозеро (табл. 2.3) (Демидов, 1993б). Здесь на флювиогляциальных отложениях залегают черные шунгитсодержащие ленточные глины мощностью 130 см, сформировавшиеся при размыве локальных шунгитовых морен южной части оз. Путкозеро. Выше залегают слой розоватых карбонатсодержащих ленточных глин мощностью 90 см. Сформировались они при перемыве морен, обогащенных карбонатными породами и развитых несколько севернее, в районе северного берега оз. Падмозеро. На розовых ленточных глинах залегают слой серых ленточных глин мощностью 90 см. По составу они более отвечают моренам, развитым на габбро-долеритах. Значительные изменения химического состава ленточных глин отмечаются и в скважинах, пройденных в других озерах (табл. 2.1–2.3). Изменение вверх по разрезу состава ленточных глин отражает последовательное отступление края материкового льда, изменение площади и состава водосбора флювиогляциальных систем стока тальных ледниковых вод, поставлявших глинистый материал в приледниковые водоемы (Демидов, 1993б). Следует отметить, что этот вывод подтверждается и результатами изучения минерального состава ленточных глин оз. Исаево (Демидов, Красильников, 1997). Содержание слюды и окисленного хлорита, не характерных для коренных пород Заонежского полуострова, возрастает вверх по разрезу ленточных глин и указывает на усиление влияния пород Онего-Сегозерско-

Таблица 2.3. Химический состав ленточных глин и алевроитов залива Фоймогуба оз. Путкозеро и оз. Падмозеро

N	Глубина, м	Химический состав, %								N × 0,0001				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	U	Tr	Pb	Rb	Sr	
Путкозеро														
ГС	0,7	59,5	14,0	4,2	5,0	4,0	3,05	3,00	2,4	16	19	145	191	
ГК	0,9	56,0	17,7	8,25	4,4	2,1	2,79	3,86	2,6	15	25	140	246	
ГР	1,8	60,5	11,7	8,74	5,03	2,7	0,81	2,23	1,5	7	9	88	212	
ГЧ	3,1	59,5	16,3	8,03	3,7	2,2	2,63	2,34	6,3	8	17	66	143	
Падмозеро														
АО	0,7	56,1	13,9	4,05	4,14	2,6	2,71	2,67	2,2	14	11	89	214	
АЗ	1,7	56,7	14,1	3,49	5,06	3,1	2,81	3,44	1,9	13	14	98	211	
АС	3,0	60,5	15,7	4,05	4,22	2,1	2,78	3,07	2,2	14	13	107	227	
АС	5,0	59,8	15,5	4,02	4,26	2,9	2,85	3,01	2,1	11	17	112	232	
ГС	6,0	58,4	17,6	4,11	4,12	2,2	2,51	2,70	1,9	8	14	88	200	
ГР	7,0	56,3	11,8	3,12	6,61	6,4	2,70	2,87	5,4	23	19	156	213	

Примечание. Глины ленточные: ГЧ – черные шунгитсодержащие, ГР – розоватые, карбонатные, ГК – коричневые, ГС – серые. Алевроиты: АС – серые, АЗ – зеленовато-серые, АО – алевроиты зеленовато-серые с органикой.

го водораздела на состав ленточных глин, формировавшихся на заключительных стадиях дегляциации района.

Таким образом, разнообразие вещественного состава различных осадочно-вулканогенных комплексов Заонежского полуострова отразилось и в химическом составе различных генетических типов четвертичных отложений, послуживших основой для формирования почвенного покрова и современных ландшафтов в целом.

Литература

- Бискэ Г. С., Лак Г. Ц., Лукашов А. Д. и др., 1971. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск: Карелия. 74 с.
- Демидов И. Н., 1993а. Развитие оледенения и формирование четвертичных отложений на Заонежском полуострове // Кижский вестник № 2. Заонежье. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 13–23.
- Демидов И. Н., 1993б. Строение ленточных глин и особенности дегляциации Центральной Карелии // Вопросы геологии докембрия. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 127–151.
- Демидов И. Н., Красильников П. В., 1997. Состав и условия формирования глинистых донных отложений оз. Исаево на Заонежском полуострове // Геология и геохимия докембрийских образований Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 40–44.
- Демидов И. Н., Лаврова Н. Б., 2000. Особенности четвертичных отложений и история геологического развития в четвертичном периоде // Инвентаризация и изучение биоразнообразия на территории Заонежского п-ова и Северного Приладожья. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 28–40.
- Лукашов А. Д., 1993. Палеосейсмодислокации Заонежья // Кижский вестник № 2. Заонежье. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 35–42.
- Лукашов А. Д., Ильин В. А., 1993. Рельеф и четвертичные отложения Заонежского полуострова // Там же. С. 23–34.

ПОЧВЫ И ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ЗАОНЕЖЬЯ

Н. Г. ФЕДОРЕЦ, Р. М. МОРОЗОВА, О. Н. БАХМЕТ, Ю. Н. ТКАЧЕНКО

Институт леса Карельского научного центра РАН

Рассматриваются особенности генезиса почв и строение почвенного покрова Заонежья Карелии, характеризующегося широким развитием почвообразующих пород, содержащих шунгитовые сланцы. Приводится почвенная картографическая схема масштаба 1 : 200 000. Установлены особенности накопления и распределения по профилю почв различного генезиса тяжелых металлов. Выявлены корреляционные взаимосвязи их содержания в почвах, количества органического вещества и физической глины. Определено наличие и характер радиальных и латеральных геохимических педобарьеров, препятствующих распространению поллютантов. Проведено описание условий миграции элементов в почвах и почвенных сочетаниях.

N. G. FEDORETS, R. M. MOROZOVA, O. N. BAHMET, Y. N. TKACHENKO.
SOILS AND SOIL COVER OF ZAONEZHYYE

Specific features of the soil genesis and structure of the soil cover of the Zaonezhye area, Karelia, noted for the wide spread of parent rocks bearing shungite schists, are considered. The 1 : 200 000 schematic soil map is provided. Patterns in the accumulation and distribution of heavy metals across the profile of soils of different genesis have been identified. Correlations between their content in the soils, organic matter and physical clay amounts have been revealed. The presence and nature of radial and lateral geochemical barriers to pollutant dispersal in the soil have been determined. The conditions for the migration of elements in soils and soil combinations have been described.

Ключевые слова: почва, почвенный покров, геохимические барьеры, тяжелые металлы, загрязнение почв, адсорбция, радиальные барьеры, латеральные барьеры, почвенная карта.

Географическое положение Заонежья определило общее направление почвообразовательного процесса, связанного с местными природными условиями, особенно с широким развитием почвообразующих пород, содержащих шунгитовые сланцы, которые придают специфические черты почвам и почвенному покрову района.

Почвенный покров Заонежья был исследован до настоящего времени недостаточно, имелись лишь отдельные сведения по характеристике почв. Отсутствовали данные по содержанию тяжелых металлов, их профильному распределению в почвах.

В связи с этим целью работы было выявление разнообразия и генезиса почв, развитых на шунгитсодержащих почвообразующих породах, составление почвенной карты района,

геохимическая характеристика почв, включающая оценку степени их загрязнения тяжелыми металлами.

Генетическая характеристика почв и почвенного покрова

Основными коренными породами Заонежья являются базальты, андезиты-базальты, углеродсодержащие сланцы, карбонатные породы, разнозернистые туфы, туфоалевриты, туфопелиты (Кратц, 1963; Голубев, 1999). На территории Заонежского полуострова развиты верхнечетвертичные (ледниковые, флювиогляциальные и озерно-ледниковые) и голоценовые (озерные и торфяные) отложения. Среди ледниковых широко распространены моренные, образующие обширные равнины

(70–80% площади полуострова). Морена представлена валунной супесью с содержанием пылеватых частиц 20–25%, валунов, гравия и гальки – 20–25%. Мощность моренного плаща колеблется в пределах 0,2–5,0 м. Флювиогляциальные отложения развиты в виде полос северо-западного простирания и представлены озами и дельтами, сложенными песчано-гравийно-галечным материалом. Озерно-ледниковые отложения представлены серыми глинами и алевритами с ленточным строением мощностью до 6–7 м и часто образуют заболоченные равнины (Лукашов, Демидов, 2001).

Около 76% площади Заонежья покрыто лесами. Преобладают хвойные древостои, на долю производных лиственных лесов приходится 38%, что обусловлено зарастанием заброшенных сельскохозяйственных угодий. Среди хвойных лесов преобладают высокопроизводительные типы: кисличные, травяно-злаковые и черничные (75%), 15% составляют избыточно увлажненные насаждения. Степень заболоченности Заонежья – наименьшая по сравнению с другими районами Карелии, болота составляют всего 5% данной территории. Мощность торфяной залежи достигает 7–8 м, подстилается сапропелями или озерными глинами. Болота в основном низинного, реже переходного типа (Волков и др., 1995).

На данной территории выделено 10 типов почв: примитивные, подбуры, буроземы, подзолистые, буроземы глеевые, дерново-глеевые, болотно-подзолистые, болотные низинные, болотные переходные и болотные освоенные.

Почвы различаются по механическому составу, содержанию органического вещества, степени дренированности, окислительно-восстановительным условиям и кислотно-щелочным свойствам.

Примитивные почвы развиваются на выходах коренных пород, приуроченных к вершинам гряд и высоким скалистым берегам. По степени развития почвообразовательного процесса они делятся на корковые, органогенные (дерновые, перегнойные, торфянистые) и щебнистые. Химический состав примитивных почв зависит от породы, из которой они образовались. В элювии диабазов много железа (до 20%), в элювии кислых пород (граниты) преобладает кремний. Вследствие малой мощности рыхлой толщи эти почвы мало плодородны. На них растут редкостойные угнетенные сосняки, а отдельные участки территории их распространения заняты зарослями можжевельника (альва-рами) (Морозова, 1991).

Подбуры формируются на элювии и элювodelювии кристаллических пород, на плоских вершинах гряд или террасированных склонах. На них растут редкостойные сосновые леса, в основном травянистые из-за изреженности древостоя, а также встречаются заросли можжевельника. Подбуры подразделяются на ро-

ды: обычные неполноразвитые, контактно-глееватые, вторично-задернованные. Профиль почв окрашен в темно-серые, черные, реже коричневые тона, состоит из горизонтов A0 – AhBfm – BC – M. Интенсивность окраски почвенного профиля зависит от породы, из которой образовался элювий, а также от содержания органического вещества. Разделение на генетические горизонты затрудняет их сильная каменистость и щебнистость. Содержание скелета колеблется от 50 до 90%. Кислотность подбуров зависит от породы, из которой образовался элювий. Почвы, развитые на элювии диабазов, кислые (табл. 3.1) по всему профилю. Весь профиль пропитан гумусом.

Характерной особенностью почвенного покрова Заонежья является широкое распространение *буроземов*. Эти почвы очень разнообразны, но общим для них является однотонная бурая или черная окраска по всему профилю, хорошо выраженная структура гумусового горизонта, слабокислая или нейтральная реакция. Для них характерна маломощная лесная подстилка типа модер или модер-мульч, которая часто задернована. Генетические горизонты выражены неясно из-за сильной щебнистости и каменистости почв, а также своеобразного черного или коричневого цвета почвообразующей породы, нивелирующей морфологические признаки генетических горизонтов. Буроземы менее каменисты, чем подбуры (Морозова, 1991; Морозова, Лазарева, 2002). Выделены следующие подтипы буроземов: типичные, темноцветные (шунгитовые); роды: обычные, оподзоленные, фрагментарные (неполноразвитые), дерновые (вторично-задернованные).

Буроземы темноцветные развиты на элювodelювии шунгитов или шунгитовой морене, характеризуются черным или темно-серым цветом, слабой дифференциацией на генетические горизонты. Морфологическое строение профиля следующее: A0 – A1 – A1B – B – BC – C. Несмотря на высокую щебнистость этих почв, отмечается хорошая комковато-зернистая структура гумусово-аккумулятивных горизонтов. Мощность почвенного профиля на вершинах гряд – около 1 м, на склонах уменьшается до 60 см, а в пониженных элементах рельефа за счет делювиальных наносов увеличивается до 1 м и более. Гранулометрический состав буроземов темноцветных разнообразен – от песков до тяжелых суглинков. Почвы имеют слабокислую или нейтральную реакцию. Состав органического вещества резко отличается от гумуса подзолистых почв высоким содержанием гумусовых кислот, связанных с кальцием и преобладающих над фульвокислотами.

Буроземы оподзоленные имеют ограниченное распространение на территории Заонежья. Они развиваются на силикатной морене с присутствием крупнозема (щебня, гальки, валунов) основных пород и шунгитового сланца.

Таблица 3.1. Содержание некоторых тяжелых металлов (мг/кг), органического вещества, физической глины и величина обменной кислотности в почвах Заонежья

Горизонт, глубина, см	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Pb	C, %	Физ. глина, %	pH _{сол.}
Подбурь (n = 4)												
A0 0–5	151,0	101,0	35 800	20,0	69,0	123,0	118,0	37,0	8,3	36,7	–	4,3
A1 5–25	168,0	98,0	42 300	28,0	80,0	136,0	121,0	48,0	5,2	2,7	34,2	4,0
Буроземы типичные (супесчаные и суглинистые) (n = 8)												
Ad 0–6	67,3	29,4	27 432	12,7	18,5	30,2	83,3	76,1	20,4	6,7	–	5,4
A1 6–20	72,6	51,1	43 544	15,6	27,9	19,1	69,2	132,0	18,5	3,9	22,5	5,3
A1B 20–45	70,8	58,2	50 920	17,4	34,8	39,8	64,2	169,3	13,3	2,3	20,1	4,8
BC 45–65	70,7	66,5	31 045	16,0	40,6	36,2	35,7	137,0	7,6	0,9	22,0	5,0
Буроземы темноцветные (супесчаные и суглинистые) (n = 10)												
Ad 0–4	136,9	52,2	36 303	14,7	47,0	59,7	195,5	81,5	20,1	8,2	–	5,7
A1 4–25	194,4	62,5	50 974	18,5	61,8	90,3	188,1	101,7	23,6	4,4	30,3	5,4
B 25–50	208,2	60,9	55 975	21,3	64,7	112,3	242,1	98,1	14,4	4,3	32,0	5,0
BC 60–70	262,3	88,5	64 000	30,0	102,5	138,5	273,0	62,1	28,1	1,2	32,0	5,3
Буроземы оподзоленные (песчаные и супесчаные) (n = 8)												
A0 0–4	75,0	51,3	19 024	6,8	23,1	23,8	105,1	68,9	17,6	30,7	–	4,7
A1A2 4–10	98,5	37,3	26 123	7,0	27,6	25,1	54,1	94,6	8,2	2,5	17,7	3,9
Bf 10–22	101,8	47,1	28 710	13,2	39,4	64,5	74,5	98,2	8,3	1,6	13,8	4,3
B2 22–38	98,8	60,1	26 190	11,7	23,9	30,5	120,0	111,0	18,8	1,2	14,4	4,4
BC 38–55	100,0	60,1	26 189	15,0	30,0	31,6	120,0	111,0	20,0	0,8	19,5	4,4
C 55–70	100,0	70,0	30 000	15,0	31,0	31,0	121,1	120,0	24,0	0,6	18,9	4,2
Буроземы глеевые (супесчаные и песчаные) (n = 7)												
Ad 0–6(7)	137,7	43,2	30 453	9,1	37,4	44,6	144,9	122,3	17,1	6,2	–	5,8
A1 6–22	141,1	47,5	40 494	11,7	39,7	50,3	141,5	144,0	15,6	3,5	28,8	4,2
B1 22–45	142,63	44,2	52 482	12,4	50,6	63,4	106,7	153,3	15,6	1,8	29,4	5,2
Bg 45–60	196,00	25,6	43 720	11,1	47,0	63,0	165,0	168,0	16,0	1,3	28,2	5,4
Cg 60–70	196,00	27,5	58 270	10,7	68,5	72,7	194,0	179,0	14,0	0,8	15,1	5,4
Подзолистые супесчаные почвы (n = 6)												
A0 0–4	15,6	36,1	4900	2,6	12,5	9,3	45,8	49,6	18,2	34,8	–	3,8
A1A2 4–10	30,6	36,3	10 828	3,6	9,1	2,7	16,6	159,5	11,7	3,3	13,8	3,9
A2 10–14	39,7	32,6	17 422	9,3	27,4	53,4	42,6	138,1	6,2	0,4	14,8	3,5
Bhf 14–28	80,0	30,0	22 000	10,0	20,1	10,0	20,0	220,0	15,0	1,3	8,9	4,0
Bf 28–40	80,0	30,0	33 000	10,0	20,1	10,0	20,0	220,0	15,0	0,4	11,4	4,2
BC 40–60	60,0	40,0	33 000	10,0	20,1	30,0	20,0	260,0	7,0	0,1	11,7	4,4
C 60–90	60,0	40,0	33 000	10,0	20,1	30,0	20,0	260,0	7,0	0,1	11,0	4,6
Перегноино-глеевые почвы (n = 5)												
A0 0–3	43,28	34,5	18 490	12,3	15,6	33,9	135,7	65,3	19,7	48,5	–	5,4
Ap 3–35	81,83	38,2	3390	25,5	21,7	47,7	220,0	73,0	13,1	43,5	–	5,3
Bg 35–70	71,28	65,5	20 998	10,8	28,0	28,1	67,5	154,7	8,7	1,8	24,2	5,4
G 70–90	73,1	80,7	24 580	15,0	35,3	59,8	52,1	177,0	9,5	0,6	42,6	4,9
Торфяные верховые почвы (n = 5)												
T0 0–8	6,64	14,3	2309	1,4	7,8	5,2	32,6	7,4	13,1	47,1	–	3,4
T1 8–20	13,24	21,7	2804	1,4	8,9	8,3	25,3	10,3	276,5	47,3	–	3,4
T2 20–50	73,93	55,0	9132	4,1	15,0	13,4	20,5	118,9	10,4	48,7	–	3,4
ПДК	150	100	–	50	50	100	300	–	32			
Кларк	90	83	30 000	18	58	47	83	340	16			
Фон		10	2750	2,0	7,2	63,4	83	–	27			

Примечание. ПДК по: Добровольский, 2003; кларк по: Виноградов, 1957; фон – среднее по Карелии (Ладонин, 2002).

Отличительной особенностью буроземов оподзоленных является наличие под лесной подстилкой гумусово-аккумулятивного горизонта A1, в котором присутствуют кремнеземистая присыпка (отбеленные кварцевые и полевошпатовые зерна) или встречаются отдельные небольшие оподзоленные пятна (A2). Эти почвы являются переходными к подзолистым вторично дерновым почвам.

Буроземы глеевые занимают нижние части склонов или пониженные равнины между сельгами. Гумусово-аккумулятивный горизонт черного или темно-серого цвета, комковато-зернистой структуры, густо переплетен корнями растений, книзу окраска несколько светлеет.

В буроземах глеевых в горизонте Bg появляются следы оглеения в виде сизых, ржавых пятен, прожилок и примазок. Нижние горизонты могут быть сильно оглеены, цвет становится сизым (G). Причинами оглеения могут быть как низкие положения в рельефе, так и двучленность почвообразующих пород.

На территории Заонежья встречаются дерново-глеевые почвы, сформировавшиеся на силикатных почвообразующих породах. По своим свойствам они близки к буроземам глеевым.

Подзолистые почвы в Заонежье имеют широкое распространение и приурочены к территориям, занятым озерными или моренными

песками и супесями силикатного состава, под хвойными лесами. Их особенностью является слабая степень оподзоленности и элювиально-иллювиальное распределение оксидов кремния, алюминия и железа по профилю, а также аккумуляция в лесной подстилке элементов органогенов (фосфора, кальция, марганца, калия, магния и серы). Минералогические особенности почвообразующих пород сказались на химическом составе почв: почти все они содержат значительно меньше кремнезема, чем почвы в среднем по Карелии, и обогащены железом, а часто и кальцием, имеют слабокислую реакцию среды. В связи с этим в Заонежье чаще распространены подзолистые почвы, для которых характерно формирование гумусово-аккумулятивного горизонта (A1), а не подзолы, в которых под лесной подстилкой залегает подзолистый горизонт A2 (табл. 3.1).

В местах распространения подзолистых почв пониженные элементы рельефа занимают *болотно-подзолистые* почвы: торфяно-подзолистые под ельниками долгомошными и перегнойно-подзолисто-глеевые под мелколиственными лесами. Для них характерен высокий уровень стояния почвенно-грунтовых вод и сезонное переувлажнение почвенного профиля, которые являются причиной образования ржаво-охристых и сизых пятен, прожилок, разводов (Федорец и др., 2000). Морфологический профиль болотно-подзолистых почв представлен следующими горизонтами: A0 (A0n, A0T) – A0A1 (A0n) – A1A2 (A1A2g) – A2 (A2g) – B (Bg) – BCg – Cg (Dg, G, M). Наиболее характерными свойствами являются кислая реакция, относительное обогащение поверхностных минеральных горизонтов кремнеземом и обеднение полуторными оксидами, накопление железа в оглеенных горизонтах. Перегнойные горизонты содержат много элементов минерального питания и обладают повышенным потенциальным плодородием. Для улучшения роста древесных насаждений необходимо регулирование водно-воздушного режима.

Болотные почвы формируются в условиях избыточного увлажнения в глубоких депрессиях, в понижениях между грядами под влаголюбивой растительностью, где процессы минерализации растительных остатков заторможены. В зависимости от химического состава вод, питающих болотные массивы, и состава торфяной залежи болотные почвы делятся на типы: болотные верховые, болотные переходные и болотные низинные; в каждом типе почв выделяются подтипы: торфяно-глеевые, мощность торфа до 50 см, и торфяные, мощность торфа более 50 см.

Болотные верховые почвы занимают небольшую площадь и чаще всего встречаются в западинах на водораздельных пространствах, сложенных силикатными моренными и водно-ледниковыми песками и супесями. Они формируются в условиях увлажнения

слабоминерализованными грунтовыми водами и атмосферными осадками, под олиготрофной растительностью – сосняками сфагновыми или сфагновыми мхами. Минеральные подстилающие породы обычно сизого цвета, сильно оглеены. Верховые почвы имеют низкую зольность (3,1%) верхних горизонтов, сильнокислые (pH_{KCl} 3,2) и бедны элементами минерального питания.

Болотные переходные почвы распространены более широко, чем верховые. Они развиваются в мезотрофных условиях водно-минерального питания под сосняками травяно-моховыми и кустарничково-моховыми. Верхняя часть болотных переходных почв сложена бедными олиготрофными или мезотрофными торфами, которые залегают на высокозольных низинных торфах. Почвы менее кислые, чем болотные верховые, pH_{KCl} верхних горизонтов колеблется от 3,5 до 4,0, низинных – от 4,0 до 4,5. Степень насыщенности основаниями низкая. По содержанию элементов минерального питания они богаче верховых, однако плохой водно-воздушный режим не благоприятствует хорошему росту древесных насаждений.

Болотные низинные почвы развиваются в местах распространения основных кристаллических пород, занимая болотные массивы, расположенные в древнеозерных бессточных котловинах, лощинах и у подножия склонов, под елово-березовыми лесами с хорошо развитой травяной растительностью и под ельниками и березняками папоротниковыми. Органогенные слои торфяно-глеевых торфяных почв характеризуются близкими агрохимическими показателями: высокой зольностью, повышенным содержанием доступных форм фосфорных и азотных соединений, низким – калийных. Процессы минерализации растительного опада идут интенсивно. Несмотря на высокое содержание зольных элементов, почвы характеризуются высокой кислотностью, что связано с большим количеством подвижных органических кислот.

Болотные перегнойно-глеевые почвы приурочены к окрайкам низинных болотных массивов. Для них характерно наличие трех горизонтов: торфяно-перегнойного (Tn), гумусово-глеевого (A1g) и глеевого (G). Почвенный профиль сильно обводнен, почвы отличаются высокой зольностью.

Почвенный покров

Почвенный покров Заонежья характеризуется чрезвычайной пестротой и сложностью (прил. 3). Больших площадей, занятых однородными ареалами, почти нет, среди них можно выделить только примитивные почвы на выходах коренных пород и поверхностно-подзолистые на озерных прибрежных песках.

Почвенный покров Заонежья уникален и разнообразен. Уникальность его заключается

в широком распространении буроземов темноцветных, развитых на элюво-делювии шунгитовых сланцев, а также моренных отложений с различным содержанием шунгитов и основных кристаллических пород.

Специфика строения почвенного покрова зависит от разнообразия форм рельефа и литологии почвообразующих пород. В местах выхода и близкого залегания к поверхности кристаллических пород распространены примитивные почвы в сочетании с подбурами и фрагментарными (неполноразвитыми) буроземами. На площадях, покрытых элюво-делювием шунгитов и шунгитовой мореной, распространены буроземы темноцветные в сочетании с буроземами глеевыми. По мере удаления от шунгитовых месторождений содержание в морене шунгитового материала уменьшается, морена приобретает смешанный состав, в котором в равной мере участвуют как основные и шунгитовые породы, так и силикатные. В этих местах распространены буроземы, которые от типичных буроземов отличаются более темной окраской, пониженной кислотностью, обогащенностью железом и элементами минерального питания. Эти почвы обычно находятся в сочетании с буроземами неполноразвитыми, приуроченными к склоновым местоположениям, и реже – с буроземами оподзоленными, занимающими пониженные формы рельефа. Выровненные пространства, покрытые силикатной мореной, занимают буроземы оподзоленные и подзолистые иллювиально-гумусовые почвы. Они встречаются в комплексе с болотно-подзолистыми и торфяно-глеевыми почвами. Глубокие котловины занимают болотные верховые и переходные почвы, в центрах болотных массивов – торфяные, а периферийные участки – торфяно-глеевые. Типичных подзолов, характерных для Карелии, на территории Заонежья немного, что связано с полимиктовым составом рыхлых отложений, в которых много пород основного и среднего состава, а также с широким распространением смешанных и лиственных, а также редкостойных лесов с хорошо развитым травяным покровом, способствующим накоплению гумуса.

В целом почвенный покров Заонежья очень сложен и мелкоконтурен, однородных крупных ареалов почти нет; каждый выделенный контур представлен сочетаниями 3–4 разновидностей почв; широко распространены буроземы темноцветные, развитые на шунгитовых моренных и водно-ледниковых отложениях. Почвенная толща имеет малую мощность, в связи с чем широкое распространение получили неполноразвитые фрагментарные почвы. Значительная освоенность исследованной территории отразилась на величине кислотности и содержании элементов минерального питания в почвах, находящихся в сельскохозяйственном использовании.

Факторы подвижности некоторых тяжелых металлов в почвах

На закрепление тяжелых металлов и их высвобождение прямое влияние оказывает механический состав почв, в связи с чем в более тяжелых почвах существует меньшая опасность возможного поглощения растениями токсичного количества тяжелых металлов. Почвы с высокой адсорбционной способностью и соответственно с высоким содержанием глин (особенно типа монтмориллонита и иллитов), а также органического вещества могут удерживать эти элементы, особенно в верхних горизонтах. Это характерно для карбонатных почв и почв с нейтральной реакцией. В данных почвах количество токсичных соединений, которые могут быть вымыты в грунтовые воды и поглощены растениями, значительно меньше, чем в песчаных кислых почвах. Однако при этом существует большой риск в увеличении концентрации элементов до токсичной, что вызывает нарушение равновесия физических, химических и биологических процессов в почвах.

Тяжелые металлы, удерживаемые органической и коллоидной частями почвы, значительно ограничивают биологическую деятельность, ингибируют процессы нитрификации, которые имеют важное значение для плодородия почв. Песчаные почвы, которые характеризуются низкой поглотительной способностью, как и кислые почвы, очень слабо удерживают тяжелые металлы, за исключением молибдена и селена. Поэтому они легко поглощаются растениями, причем некоторые из них даже в очень малых концентрациях обладают токсичным воздействием.

Для того чтобы какой-либо металл был адсорбирован корневой системой растений, он должен находиться в растворимой форме. Гидроокиси и карбонаты тяжелых металлов слабо-растворимы, и с повышением pH почвенного раствора возрастает вероятность образования нерастворимых гидроокисей и карбонатов. Существует единое мнение, что для снижения до минимума доступности тяжелого металла в почве необходимо поддерживать величину pH около 6,5. Известно, что такие металлы, как цинк, никель, медь, свинец, энергично мигрируют в кислых растворах и слабо подвижны в нейтральных и щелочных, особенно в форме катионов. Железо и кобальт отличаются умеренной миграцией в зависимости от кислотно-щелочных условий, их подвижность в большей степени связана с окислительно-восстановительными условиями (Федорец и др., 1998).

Металлы могут образовывать сложные и комплексные соединения с органическим веществом почвы, и поэтому в почвах с высоким содержанием гумуса они менее доступны для поглощения растениями. Обменная емкость катионов зависит в основном от содержания и минералогического состава глинистой фракции

и содержания органического вещества в почве. Чем выше обменная емкость катионов, тем больше способность почв (в определенных пределах) удерживать тяжелые металлы, что исключает их попадание в токсичных концентрациях в растения, а также в животных и человека. Растворимые органические соединения, которые могут координироваться с тяжелыми металлами, делятся на три группы: органические вещества с низкой молекулярной массой, фульво- и гуминовые кислоты. Порядок стабильности комплексов фульвокислот с металлами для некоторых металлических двухвалентных катионов при концентрации ионов 0,1 (моль/л) следующий: при pH 3,0: $Cu > Ni > Co > Pb > Zn$; при pH 5,0: $Ni > Co > Pb > Cu > Zn$.

Избыток воды в почве благоприятствует появлению в ней металлов с низкой валентностью в более растворимой форме. Накопление самых подвижных, и следовательно, самых активных веществ зависит от водопроницаемости почвы. В связи с этим очень важно наличие или отсутствие в почве водонепроницаемого горизонта. Химические элементы находятся в состоянии дисперсии или накопления в процессе миграции (Рэуце, Кырстя, 1986). Так, железо и кобальт по степени подвижности (способности химических элементов переходить из твердой фазы в жидкую) объединяются в группу подвижных и слабо подвижных в восстановительной среде и инертных в окислительной. Никель, медь, цинк и свинец объединены по степени подвижности в одну группу элементов – подвижных и слабо подвижных в окислительной среде и инертных в сероводородной среде. Ванадий подвижен и слабо подвижен в окислительной и инертен в глеевой сероводородной среде. Хром относится к группе элементов малоподвижных в большинстве обстановок (Федорец и др., 1998).

Степень передвижения химических элементов обуславливается также наличием механических, физико-химических и биологических барьеров, способствующих их осаждению, отложению и накоплению. Эти барьеры, называемые геохимическими, появляются обычно в зонах, где происходят изменения скорости перемещения воды или воздушного потока, увеличение концентрации растворов, окислительно-восстановительного потенциала, уровня кислотности, биологических условий. Действия этих барьеров взаимозависимы. Примером могут служить гумусовые горизонты почв, способные действовать одновременно как физико-химические, так и биологические барьеры адсорбции, содействуя максимальному накоплению микроэлементов.

Кобальт обычно находится в почвах в количестве 1–10 мг/кг (допустимый предел 50). Этот элемент адсорбируется составными частями почвы и закрепляется в решетке глинистых минералов. В почвах наблюдается слабое, но устойчивое увеличение его содержания

с глубиной. В земной коре содержание кобальта составляет 20 мг/кг. Почвы, сформировавшиеся на ультраосновных эффузивных породах, содержат повышенное количество кобальта. В исследуемом районе (табл. 3.1) содержание кобальта в лесных подстилках автоморфных почв составляет 2,5–20 мг/кг (среднее – 8,2), фон по Карелии для лесных подстилок 1,8. В торфяных почвах количество кобальта ниже, чем среднее по району.

Никель в почве составляет 20–50 мг/кг (при допустимой норме 50). В исследуемом районе количество его колеблется от 12,5 до 60 мг/кг, при среднем 23,2, в переувлажненных почвах (торфяных) – значительно ниже среднего. Фоновое содержание никеля в лесных подстилках Карелии – низкое и составляет 7,2 мг/кг. В окисленной среде этот элемент подвижен или слабо подвижен, в щелочной слабо мигрирует, в кислой – активно. Соединения никеля подвижны и слабоподвижны в восстановительной среде и инертны в окислительной, миграция умеренная.

Медь обычно содержится в почвах в количестве 1–20 мг/кг. В почвах с высоким содержанием органического вещества и глины подвижность меди низкая. При загрязнении почв медью возникает угроза эрозии и уплотнения. Предельно допустимая концентрация меди в почвах составляет 100 мг/кг. Фоновое содержание меди в лесных подстилках Карелии составляет 37,9 мг/кг. В южной части Медвежьего района отмечено накопление меди в лесных подстилках, составляющее 1,5 ПДК. Ее количество колеблется от 9 до 60 мг/кг, увеличиваясь с глубиной. Среднее накопление по исследуемому району меди в лесных подстилках – 35,6 мг/кг. В торфяных почвах отмечено содержание меди меньше, чем в среднем по району. Гидроокиси меди осаждаются при pH 5,4. В процессе гипергенеза подвижны либо слабо подвижны в окислительной среде. Энергично мигрируют в кислых растворах и слабо подвижны в нейтральных и щелочных.

Цинк содержится в почвах от 30 до 50 мг/кг, предельно допустимая концентрация составляет 300. В почвах цинк достаточно подвижен. Избыточное его накопление вызывает ухудшение физических и физико-химических свойств почвы, снижает микробиологическую активность. Миграция цинка по профилю почвы наиболее активно происходит в песчаных почвах, что связано как с механическим составом, так и с низкой емкостью катионного обмена. Осаждение гидроокиси цинка происходит при pH почвенного раствора 5,2. В процессе гипергенеза в окислительной среде этот элемент подвижен, бывает слабо подвижен. Энергичная миграция происходит в кислых растворах, а в слабокислых или щелочных – слабая, особенно в виде катионов. В почвах с глубиной содержание цинка убывает. В кислых почвах содержание цинка обычно низкое в связи с

высокой подвижностью в кислой среде его соединений (50 мг/кг). Фоновое накопление цинка в лесных подстилках Карелии составляет 67,6 мг/кг, в Онежском рудном районе – от 45 до 340, среднее составляет 214. Распределение по профилю почв либо равномерное, либо отмечается снижение с глубиной, в торфяных почвах намного ниже средних для района показателей.

Хром в больших количествах хотя и вызывает загрязнение почв, но токсичен для живых организмов лишь в шестивалентной окисленной форме, образующейся только при определенных условиях pH и окислительно-восстановительного потенциала и не сохраняющейся в почве в течение длительного времени. В почвах обычно содержится в количестве 2–50 мг/кг (при допустимой норме 100). По степени растворимости соединения хрома относятся к классу В, малоподвижны в большинстве сред. Миграция слабая с образованием химических комбинаций, могут мигрировать и в форме природных металлов. Содержание хрома в почвах тесно связано с его наличием в почвообразующих породах. Исследователи не находят существенной разности между содержанием хрома в кислых и богатых кальцием почвах, хотя известно, что его подвижность связана с величиной pH почвенного раствора. Фоновое содержание хрома в лесных подстилках на территории Карелии составляет 10,0 мг/кг, т. е. накопление невелико. Однако в исследуемом районе содержание хрома в лесных подстилках значительно выше и колеблется в различных почвенных типах от 30 до 90, при среднем накоплении 38,7 мг/кг. Распределение по профилю такое же, как у цинка. В органогенных почвах содержание хрома близко к средним для исследуемого района данным.

Ванадий содержится в почвах в количестве около 60 мг/кг, предельно допустимые концентрации составляют 150. В процессе гипергенеза он инертен в восстановительной среде. Энергично мигрирует в форме анионов как в кислой, так и в щелочной среде. В Карелии содержание ванадия в почвах иногда достигает 150 мг/кг. В почвах исследуемого района колеблется от 15 до 137, среднее значение – 43 мг/кг. Четко прослеживается возрастание содержания с глубиной. Для переувлажненных почв (торфяных) отмечены низкие показатели накопления ванадия, однако с глубиной количество его возрастает.

Свинец обычно содержится в почвах от 0,1 до 20 мг/кг, предельно допустимая концентрация – 32. Величина pH, при которой осаждаются гидроокиси свинца, равна 6,0. Наибольшее количество свинца в автоморфных почвах, как правило, находится в верхнем 15-сантиметровом слое. В кислых дерново-подзолистых почвах происходит транзитный перенос свинца из верхних в нижние горизонты. В дерново-подзолистых почвах иллювиальный горизонт содержит

больше свинца, чем почвообразующие породы. Фоновое содержание свинца в лесных подстилках Карелии составляет 23,3 мг/кг. Повышенное, в отдельных случаях достигающее ПДК содержание свинца в почвах на территории Карелии выявлено в Медвежьегорском районе вдоль побережья Беломорско-Балтийского канала. В целом в Заонежье колебание содержания свинца в органогенных горизонтах составляет 17–26, среднее – 17,4 мг/кг. В торфяных почвах накопление свинца близко к количеству его в лесных подстилках.

Стронций обычно содержится в почвах в количестве от 28 до 300 мг/кг, кларк составляет 380. Предельно допустимые концентрации не установлены. В процессе гипергенеза стронций подвижен в растворах. В почвах Карелии содержание стронция достигает в отдельных случаях 680 мг/кг. В органогенных горизонтах почв Онежского рудного района содержание стронция составляет от 43 до 122, при среднем значении 66 мг/кг. С глубиной количество его возрастает. В органогенных горизонтах торфяных почв количество стронция низкое, однако в нижележащих минеральных горизонтах отмечено резкое возрастание его содержания.

Железо. Общее содержание железа в почвах колеблется в довольно широких пределах от 1,5 до 3%. Показатель pH, при котором осаждается гидроокись трехвалентного железа, – 2,0, двухвалентного – 5,5. При гидролитическом разложении процесс выщелачивания железа протекает слабо. В процессе гипергенеза этот элемент подвижен в восстановительной среде, миграция умеренная. Фоновое содержание железа в лесных подстилках Карелии составляет 0,3%. В лесных подстилках исследуемого района его содержание колеблется от 4900 до 52 000 мг/кг, среднее – 18 590. С глубиной по почвенному профилю накопление железа увеличивается. Накопление и распределение по профилю аналогично для торфяных и минеральных почв.

В. В. Добровольским и Г. А. Цветковой (Ландшафтно-геохимическое районирование..., 1983) территория Карелии разделена на шесть крупных ландшафтно-геохимических районов. Исследуемая территория включена в третий ландшафтно-геохимический район – центральный, для которого фоновые уровни многих микроэлементов в почвах (ванадия, меди, цинка, кобальта, хрома, молибдена и др.) в среднем ниже кларковых значений (Виноградов, 1957), но в местах близкого расположения протерозойских диабазов и шунгитовых сланцев содержание металлов повышается до кларковых, а иногда и превышает их.

Проведенные исследования показали (табл. 3.1), что наибольшее количество кобальта и никеля накапливается в шунгитовых буроземах в районах распространения месторождений и во много раз превышает фоновые показатели по Карелии (Федорец, 2001). Эти

металлы слабо мигрируют в нейтральной и щелочной средах, прочно закрепляются органическим веществом почв.

Содержание меди колеблется в исследуемых почвах в широких пределах. В почвах буроземного типа, характеризующихся слабокислой и близкой к нейтральной реакцией среды, накопление меди довольно высокое и в отдельных случаях превышает кларк в 2–3 раза.

Высокие концентрации цинка, до 200–273 мг на кг абсолютно сухой почвы, отмечены в районе месторождения шунгитовых сланцев, что объясняется низкой подвижностью соединений цинка в буроземных почвах, характеризующихся слабокислой или близкой к нейтральной реакцией среды.

Валовое содержание хрома и ванадия в исследуемых почвах не превышает фоновых для территории Карелии значений.

Количество свинца в почвах в целом невелико, лишь в почвах территорий, прилегающих к автомобильным трассам, содержание его превышает предельно допустимые концентрации.

Накопление стронция в наибольших количествах выявлено в пахотных горизонтах почв, находящихся в сельскохозяйственном использовании, что связано, по нашему мнению, с применением известковых материалов и минеральных удобрений, в первую очередь, суперфосфата.

Содержание железа велико во всех почвах на территории Заонежья, в лесных подстилках его накапливается в 10 раз больше, чем в среднем по Карелии. Особенно высокие его показатели, превышающие кларк в 2–3 раза, отмечены в почвах, сформировавшихся на диабазе или на рыхлых отложениях с примесью пород, обогащенных железом.

Установлена зависимость накопления тяжелых металлов от механического состава почв и содержания органического вещества в почвах буроземного типа. Наиболее высокие положительные коэффициенты корреляции с содержанием органического вещества выявлены для органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтов буроземов всех типов, они составляют для свинца 0,53–0,89; цинка – 0,57–0,86; кобальта – 0,51–0,75; никеля – 0,76; меди – 0,55; железа – 0,79.

Для минеральных горизонтов типичных буроземов выявлены положительные коэффициенты взаимосвязи валового содержания кобальта, хрома, а также никеля и меди и количества физической глины (0,94; 0,84; 0,93; 0,98). В буроземах глеевых, характеризующихся более высоким содержанием физической глины в минеральных горизонтах, в горизонте Bg накапливаются кобальт, никель, медь, цинк, свинец и железо, соответственно коэффициенты корреляции этих элементов следующие: 0,51, 0,62, 0,68, 0,90, 0,94, 0,67. В глеевом горизонте (G) также выявлена прямая корреляционная

взаимосвязь между количеством мелкодисперсной фракции (физическая глина) и количеством тяжелых металлов: кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, ванадия, свинца (0,66; 0,98; 0,73; 0,99; 0,94, 0,63; 0,90, соответственно).

В темноцветных буроземах с высоким содержанием углерода по всему профилю и высокой сорбционной способностью шунгитовых сланцев, обогащающих весь почвенный профиль, в горизонтах A и B накапливаются никель, медь, цинк, хром, ванадий, свинец, железо. В переходном к почвообразующей породе горизонте BC темноцветных буроземов выявлена прямая корреляционная связь с содержанием физической глины для никеля (0,53), цинка (0,92), хрома (0,67), ванадия (0,56).

По величине обменной кислотности почвы района классифицированы следующим образом: если показатель pH солевой вытяжки ниже 4 – почва сильнокислая, 4–5 – кислая, 5–6 – слабокислая, 6–7 – нейтральная, более 7 – щелочная. Вся территория района по уровню почвенной кислотности четко разделяется на две части: западную и восточную (рис. 3.1).

Восточная часть – это территория распространения буроземов шунгитовых на шунгитовых сланцах и силикатной морене с большой примесью шунгита и основных пород. Среди гидроморфных почв преобладают торфяно-глеевые и перегнойно-глеевые. Лесные подстилки на значительной территории характеризуются слабокислой реакцией, гумусово-аккумулятивные A1 и иллювиальные горизонты B – более высокой кислотностью (по нашей градации – кислые), почвообразующая порода – кислая и слабокислая, на отдельных участках – близка к нейтральной.

Западная часть исследуемой территории отличается повышенной почвенной кислотностью. Здесь распространены, в основном, буроземы супесчаные на силикатной морене в сочетании с подзолистыми супесчаными почвами, буроземы оподзоленные и оглеенные. Среди гидроморфных почв преобладают торфяные переходного типа, зачастую осушенные. Лесные подстилки характеризуются кислой, а местами сильнокислой реакцией, гумусово-аккумулятивные горизонты – сильнокислые, с глубиной кислотность снижается до кислой и слабокислой.

По условиям окислительно-восстановительных реакций почвы разделены на три группы: условия окисления (автоморфные почвы), периодического окисления и восстановления (полугидроморфные) и восстановления (гидроморфные).

Радиальные геохимические барьеры в профиле основных типов почв

Распределение элементов в вертикальном профиле почвы в значительной степени зависит от характера геохимических барьеров.

Основываясь на классификации физико-химических барьеров А. И. Перельмана (1989), в почвах Заонежья можно выделить следующие классы барьеров: органо-сорбционные; глеевые в переувлажненных почвах; сорбционные, связанные с наличием в почвенном профиле прослоек более тяжелого механического состава, а также при подстилании почвообразующей породы другой породой (табл. 3.2).

Выделены группы почв, имеющие, как правило, один вид барьеров – сорбционный или глеевый, и многобарьерные почвы с органо-сорбционными и глеевыми барьерами. Основными типами почв данного района являются буроземы, сформировавшиеся на шунгитовых сланцах и шунгитовой морене, для которых, по нашему мнению, характерным является сорбционное закрепление элементов на фоне слабокислых и близких к нейтральным условий. Радиальные барьеры в буроземных почвах, сформировавшихся с различным участием шунгитовых сланцев в почвообразующей породе, названы нами сорбционно-шунгитовые. Как показали исследования, для лесных почв в верхней части профиля характерно наличие

органо-сорбционного барьера – лесной подстилки.

Рассмотрим характер распределения по почвенному профилю тяжелых металлов в связи с почвенной кислотностью, механическим составом, окислительно-восстановительными условиями в конкретных почвенных разностях.

Подбуры на элюво-делювии коренных пород

Данные почвы относятся к кислым, в них складываются окислительные условия. В лесных подстилках содержание свинца выше, чем в подподстилочном горизонте. Отмечено небольшое биогенное накопление хрома в лесной подстилке. Такие металлы, как ванадий, железо, кобальт, никель, медь, цинк, стронций, накапливаются в подподстилочном минеральном горизонте, что свидетельствует о тесной взаимосвязи химического состава подбуров с минералогическим составом почвообразующей породы. Хром и свинец попадают на поверхность почвы в результате аэротехногенного загрязнения территории и накапливаются в подстилках, в подподстилочном горизонте количество его снижается, а вниз по профилю опять возрастает.

Таблица 3.2. Окислительно-восстановительные условия и типы радиальных геохимических барьеров в почвах Заонежья

Щелочно-кислотные условия	Окисление	Периодическое восстановление	Восстановление
Сильнокислые (рН менее 4)		Торфянисто-подзолисто-глеевые; перегнойно-подзолисто-глеевые. Органо-сорбционный, глеевый	Болотные верховые; торфяно-глеевые верховые. Органо-сорбционный, глеевый
Кислые (рН 4–5)	Буроземы оподзоленные. Органо-сорбционный и сорбционно-шунгитовый. Подзолистая супесчаная. Органо-сорбционный	Буроземы глеевые. Восстановительно-глеевые	Болотные переходные. Органо-сорбционный, глеевый
Слабокислые (рН 5–6)	Буроземы темноцветные на шунгитовых сланцах; буроземы темноцветные на шунгитовой морене. Органо-сорбционный, сорбционно-шунгитовый		Перегнойно-глеевые. Органо-сорбционный, глеевый
Нейтральные (рН 6–7)	Буроземы темноцветные на силикатной морене с включением шунгита; буроземы темноцветные на силикатной морене с большим включением шунгита и основных пород. Органо-сорбционный, сорбционно-шунгитовый		
Сильнокислые/кислые*	Подзол иллювиально-железисто-гумусовый песчаный. Органо-сорбционный. Поверхностно-подзолистая песчаная. Органо-сорбционный	Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый. Органо-сорбционный, глеевый	
Кислые/сильнокислые*	Бурозем типичный супесчаный на силикатной морене с примесью шунгита; бурозем фрагментарный. Органо-сорбционный, сорбционно-шунгитовый		
Слабокислые/кислые*			Болотная низинная. Органо-сорбционный, глеевый

Примечание. * – изменение кислотно-щелочных условий по профилю почв.

Миграция химических элементов в профиле подбуров в значительной степени обусловлена строением почвенного профиля, характеризующегося малой мощностью и близким подстилением коренной породы, в данной случае слабовыветрившихся диабазов. В результате миграция элементов вглубь затруднена, а преобладает, скорее всего, боковой сток в виде растворов или суспензий.

Бурозем оподзоленный песчаный на супесчаной морене

Почва кислая, на глубине 6–20 см, т. е. в оподзоленном горизонте, сильноокислая, характеризуется окислительными условиями. Содержание ванадия, хрома, никеля, меди, кобальта и стронция увеличивается вниз по профилю. Свинец накапливается в подстилке. Большинство названных элементов в подбурках и оподзоленных буроземах ведут себя аналогичным образом, исключением является цинк, содержание которого в горизонте с повышенной кислотностью резко падает в связи с его повышенной миграционной способностью в кислых средах, а при уменьшении кислотности – накапливается в почве.

Бурозем темноцветный суглинистый на шунгитовой морене

Данные почвы относятся к слабокислым или нейтральным, причем обменная кислотность остается практически равномерной по всему профилю. Дренаж хороший, условия окислительные. Следует отметить высокую сорбционную способность данных почв (барьер сорбционно-шунгитовый). Распределение по профилю стронция и кадмия равномерное. Содержание никеля, меди, хрома, ванадия, кобальта, свинца и цинка слабо изменяется по профилю. Количество их в гумусово-аккумулятивном горизонте и почвообразующей породе близко.

Бурозем типичный супесчаный на легкосуглинистой морене

Верхняя часть профиля данных почв имеет кислую реакцию (рН 4–5), на глубине около 20 см кислотность резко увеличивается. Условия дренажа хорошие, среда окислительная. Характеризуется наличием сорбционных барьеров. Стабильно по профилю распределение меди. Валовое содержание кобальта, стронция, ванадия, хрома, никеля в лесной подстилке или дерновом горизонте (в зависимости от типа биоценоза) ниже, чем в минеральной части профиля. Цинк и в меньшей степени свинец накапливаются в подстилке.

Бурозем типичный легкосуглинистый на суглинистой морене

Данные почвы относятся к кислым (рН 4–5), на глубине около 20 см кислотность резко увеличивается, а затем возвращается к прежним

величинам. Условия дренажа хорошие, среда окислительная. Характеризуются наличием сорбционных барьеров. По общему содержанию микроэлементов буроземы тяжелого механического состава (суглинистые) и более легкого (супесчаные) отличаются незначительно, но распределение по профилю тяжелых металлов различное. Содержание ванадия и хрома слабо изменяется по профилю. С глубиной возрастает количество кобальта, никеля, меди и стронция. В лесных подстилках накапливаются цинк и свинец.

Бурозем глееватый супесчаный на силикатной морене с большой примесью шунгитовых сланцев и основных пород

Данные почвы относятся к кислым (4–5), в верхней части профиля обменная кислотность ниже, с глубиной возрастает. Дренаж хороший, но периодически отмечается переувлажнение за счет низкого положения в рельефе, в результате складываются окислительно-восстановительные условия. Характеризуются наличием восстановительно-глеевых барьеров. Распределение тяжелых металлов по профилю данных почв определяется легким песчаным механическим составом и уровнем кислотности. Относительно равномерно по профилю распределяются никель, кобальт, ванадий. С увеличением почвенной кислотности и в условиях восстановительной среды увеличивается подвижность цинка и, в небольшой степени, хрома. В результате отмечается снижение их содержания в почве. Возрастает вниз по профилю количество меди, так как известно, что комплексные соединения меди с фульвокислотами достаточно стабильны при рН, близком к 5 (Ладонин, 2002). Отмечено накопление свинца на поверхности почвы, связанное, по всей вероятности, с аэротехногенным загрязнением территории.

Подзолистая супесчаная на супесчаной морене с примесью шунгитовых сланцев

Обменная кислотность в разных горизонтах различна: верхний органический горизонт – кислый (рН 4,0–4,3), гумусово-аккумулятивный с признаками оподзоливания – сильнокислый (<4,0), нижняя часть профиля – кислая. Хороший дренаж, условия окислительные. Характеризуется безбарьерностью. В связи с легким механическим составом, высокой кислотностью и отсутствием барьеров в профиле почв отмечается практически равномерное распределение ванадия, кобальта, свинца, которые из верхних почвенных горизонтов просачиваются вниз по почвенному профилю. Количество хрома, никеля, меди, цинка наименьшее в подзолистом горизонте, который характеризуется повышенной кислотностью. Стронция больше всего накапливается в подзолистом горизонте и на контакте с материнской породой.

Перегноино-глеевая почва

Почва кислая, условия среды восстановительные при избыточном увлажнении. Почвы характеризуются многобарьерностью: выделены органо-сорбционные и восстановительные барьеры. Отличаются равномерным распределением по профилю содержание хрома. Ванадий, никель, цинк, кобальт, медь, свинец накапливаются с глубиной. Стронций приурочен к органогенному горизонту А1.

Торфяные верхового типа

Данные почвы сильнокислые, условия среды восстановительные. Почвы характеризуются многобарьерностью: выделены органо-сорбционные и восстановительные барьеры. Содержание большинства элементов (никеля, меди, хрома, кобальта, стронция, ванадия) увеличивается с глубиной, т. е. они накапливаются на восстановительном барьере, цинк и свинец – в верхних органогенных горизонтах.

Таким образом, оценка распределения химических элементов по почвенному профилю и выявление взаимосвязи их с гранулометрическим составом, содержанием органического вещества, окислительно-восстановительными и кислотно-щелочными условиями, которые являются геохимическими барьерами для многих групп химических элементов, показали, что каждый из определяемых нами металлов имеет свои особенности распределения в почвенном профиле. Некоторая равномерность распределения в почвенном профиле свойственна никелю и хрому. Для свинца в большинстве случаев характерно снижение концентрации с глубиной. Как правило, увеличивается вниз по профилю количество ванадия и кобальта, в меньшей степени – меди. Цинк в отдельных случаях накапливается в нижних почвенных горизонтах при одновременном снижении почвенной кислотности.

Кроме того, каждая из исследованных нами почв характеризуется своей спецификой распределения металлов: следует отметить высокую сорбирующую способность буроземов темноцветных, развитых на шунгитовых сланцах и морене и имеющих сорбционно-шунгитовые барьеры. Все почвы, содержащие значительное количество шунгитов в почвенном профиле, отличаются высокой способностью удерживать тяжелые металлы. Это же можно отметить и для многобарьерных почв.

Латеральные геохимические барьеры

На границе контрастных в геохимическом отношении почв формируются так называемые латеральные барьеры (Глазовская, 1972, 1981, 1983; Гаврилова и др., 1983; Перельман, 1989), отражающие горизонтальную дифференциацию в пределах почвенно-геохимических сопряжений – катен. Они характеризуются показателем геохимической контрастности, обусловленной структурой почвенного покрова,

четкостью и резкостью проявления латеральных барьеров. В настоящее время выделяют три степени контрастности латеральной миграции: слабая, средняя и сильная. В основу различий положены, как и при характеристике вертикальной миграции элементов по почвенному профилю (радиальной), изменения окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий в пределах катен.

К слабоконтрастной относится латеральная миграция, протекающая при одинаковых или близких окислительно-восстановительных (ОВ) и щелочно-кислотных (ЩК) условиях. Контрастной миграции присуща смена либо ЩК, либо ОВ-условий, реже тех и других при их незначительных отклонениях.

Сильноконтрастная миграция наблюдается при резкой смене в пределах почвенной катены как ЩК, так и ОВ-условий. Таким образом, наиболее типичные для исследуемого района сопряжения следующие: катены 1 и 2, состоящие из трех почв, могут характеризоваться как контрастно-сильноконтрастные, катены 3 и 4, состоящие каждая из двух почв, – как сильноконтрастные (табл. 3.3). Проведенные исследования особенностей накопления и латеральной миграции элементов показали, что в контрастно-сильноконтрастных сопряжениях большинство определенных нами химических элементов довольно прочно закреплено в шунгитовых буроземах. Для катены, состоящей из песчаной подзолистой и перегноино-глеевой почв и охарактеризованной нами как сильноконтрастная, отмечено накопление большинства элементов в перегноино-глеевых почвах, отличающихся восстановительными условиями, слабокислой реакцией среды и многобарьерностью.

Оценка условий миграции тяжелых металлов в почвах и почвенном покрове на территории Заонежья

На почвенной карте выделено 15 почвенных контуров, состоящих из одной или нескольких почв с различными условиями миграции элементов. Для каждого почвенного контура характерно наличие специфических барьеров.

Сорбционно-шунгитовые барьеры типичны для шунгитовых почв, которые обладают высокой сорбционной способностью практически на протяжении всего почвенного профиля и занимают повышенные и плакорные участки территории. На склоновых участках территории располагаются буроземы оподзоленные легкого механического состава, отличающиеся сорбционными барьерами, но менее емкими. На нижней части склонов располагаются почвы с периодическими условиями переувлажнения, например, буроземы глеевые, характеризующиеся наличием восстановительно-глеевых барьеров. Участкам, занятым болотными почвами, присуща многобарьерность, т. е. наличие

Таблица 3.3. Распределение микроэлементов в профиле почвенных сопряжений в районе Онежского рудного бассейна, мг/кг

Горизонт, глубина, см	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Mo	Pb
Катена 1										
Бурозем темноцветный на супесчаной шунгитовой морене, вершина моренного холма										
A0 0–3	25,1	31,7	8460	4,8	13,1	24,6	100	35,6	0,62	12,6
A1 3–24	103	84,0	24 470	14,0	49,0	42,0	89,4	61,5	2,2	8,1
BC 53–70	84,3	75,7	34 770	20,1	50,3	97,5	88,3	70,0	0,54	7,1
Бурозем оподзоленный на супесчаной морене, склон моренного холма										
A0 0–4	37,2	39,3	9268	8,0	24,9	27,6	343	65,9	0,39	25,6
A1A2 4–10	87,4	75,2	30 650	18,1	44,6	133	48,8	100	0,30	6,7
C 55–70	98,8	60,1	26 190	11,7	23,9	30,5	120	110	0,28	18,8
Перегноино-глеевая суглинистая почва на ленточных глинах, подножие моренного холма										
A0 0–3	8,3	19,5	2900	2,9	13,6	11,7	57,7	25,6	0,25	3,4
T 3–35	21,3	51,3	9216	3,1	8,5	25,9	8,0	41,2	0,26	3,0
G 70–глубже	73,1	80,7	24 580	13,0	35,3	59,8	52,1	143	0,42	9,5
Катена 2										
Бурозем темноцветный на супесчаной шунгитовой морене, вершина моренного холма										
Ad 0–7	151	101	35 830	20,5	69,1	123	118	37,7	3,2	8,3
A1 7–25	169	98	42 290	28,3	80,4	137	121	48,3	3,4	7,1
BC 25–50	202	102	42 290	23,9	82,9	164	128	40,9	3,5	5,2
Бурозем оподзоленный на силикатной морене с примесью шунгита и основных пород, склон моренного холма										
A0 0–6	28,2	29,2	6134	4,7	8,1	9,6	56,7	34,3	0,65	1,2
A1A 26–20	95,8	55,3	20 548	9,6	24,1	15,9	189	127	0,61	6,7
B 20–50	116	61,0	24 880	11,3	26,8	103	41,3	123	0,56	5,9
Торфяная почва верхового типа, понижение рельефа между моренными холмами										
T0 0–8	6,6	14,3	2309	1,4	7,8	5,2	32,6	7,4	0,49	13,1
T1 8–16	13,2	21,7	2804	1,4	8,9	8,3	25,3	10,3	0,87	27,7
Dg 44–70	73,9	55,0	9132	4,1	15,0	13,4	20,5	119	0,90	10,4
Катена 3										
Подзолистая иллювиально-железистая песчаная на силикатной морене, выположенная вершина моренного холма										
A0 0–4	10,9	16,5	2460	2,4	5,5	4,0	42,0	30,3	0,28	5,8
A1 4–12	29,6	29,4	8890	3,7	9,8	4,8	26,9	152	0,30	15,3
BC 40–60	32,9	16,8	10160	4,9	19,1	19,7	10,8	183	0,12	5,6
Перегноино-глеевая суглинистая на ленточных глинах, низина между моренными холмами										
A0 0–2	6,9	10,9	2950	3,6	9,3	24,1	43,2	21,7	0,02	4,8
Ad 2–9	7,5	17,7	3916	4,8	9,6	10,7	26,0	26,6	0,12	7,4
Bg 20–35	68,0	74,4	23 460	10,7	30,0	23,3	114	140	0,20	10,6
Катена 4										
Бурозем темноцветный легкосуглинистый на шунгитовой морене, коренной берег оз. Путкозеро										
Ad 0–4	154	78,4	29 650	12,9	34,9	51,0	188	92,6	2,2	13,2
A1 4–26	127	61,6	26 870	12,2	33,8	45,4	152	101	2,2	11,2
BC 26–48	179	77,3	33 285	16,1	59,5	81,3	195	94,1	2,8	14,6
Перегноино-глеевая почва на погребенном торфе, подстилаемом ленточными глинами, понижение рельефа, 100 м от оз. Путкозеро										
Ad 0–3	95,7	43,1	47 930	32,1	22,7	48,5	281	30,9	1,6	32,2
AB 3–20	229	51,3	104 500	81,6	37,6	99,6	640	39,5	2,2	14,0

органо-сорбционных и глеевых барьеров, на которых происходит сорбирование тяжелых металлов и других токсикантов. Некоторые почвы, а соответственно, и некоторые территории не имеют почвенных барьеров – это примитивные почвы и поверхностно-подзолистые на озерных песках, подбуры и песчаные подзолы на песчаных почвообразующих породах. Следует отметить, что почвенный покров выделенных на карте контуров неоднороден по степени концентрации металлов даже при наличии аналогичных барьеров. Это объясняется различной степенью участия барьерных и безбарьерных почв в формировании почвенного покрова на каждой конкретной территории.

Поконтурное описание щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных условий на территории Заонежья позволило выявить для восьми почвенных сочетаний, имеющих на

почвенной карте, ведущие латеральные барьеры: сорбционно-шунгитовые для сочетаний буроземов фрагментарных и оподзоленных, буроземов на силикатной морене с большой примесью шунгита и диабазов и оподзоленных, для территорий, занятых буроземами шунгитовыми на шунгитовых сланцах и шунгитовой морене; сорбционные для сочетания буроземов супесчаных на силикатной морене с включением шунгитов и подзолистых супесчаных почв; восстановительно-глеевые для буроземов оподзоленных на силикатной морене и буроземов глеевых и для территорий, занятых глеевыми буроземами; органо-сорбционные – территории с торфяными почвами; многобарьерные органо-сорбционные и глеевые – территории с торфяно-глеевыми и торфянисто-подзолисто-глеевыми почвами. Безбарьерными являются территории, занятые примитивными почвами на

выходах коренных пород, а также по-верхностно-подзолистыми на озерных песках. Основываясь на характеристике существующих в исследуемом районе сопряжений, можно прогнозировать интенсивность миграции элементов в почвах и почвенном покрове.

Оценка загрязнения почв тяжелыми металлами на территории Заонежья

Тяжелые металлы, содержащиеся в почве, через трофическую цепь поступают в растения, а затем потребляются животными и человеком. В круговороте тяжелых металлов участвуют различные биологические барьеры, вследствие чего происходит выборочное биоаккумуляция, защищающее живые организмы от избытка этих элементов. Однако деятельность биологических барьеров ограничена, и чаще всего тяжелые металлы концентрируются в почве.

Рассмотрим уровни накопления и, следовательно, загрязнения различных почв на территории Заонежья тяжелыми металлами. Содержание кобальта в обследованных нами почвах колеблется от 4 до 50 мг/кг. Наиболее загрязненными являются темноцветные буроземы в районах деревень Толвуя, Шуньга, Еркова Новинки, Типиницы, Угольная, а также вблизи Зажогинского месторождения (20–50 мг/кг). Содержание кобальта во много раз превышает фоновые по Карелии показатели (1,9), но в отдельных случаях едва достигает ПДК.

Количество никеля в почвах тоже довольно высокое, особенно в районах названных деревень (60–140 мг/кг), в других местах Заонежья этот показатель составляет всего 8–40 мг/кг. Количество никеля во много раз превышает фоновые показатели по Карелии (7,2 мг/кг), а также ПДК (50). Как кобальт, так и никель слабо мигрируют в щелочной среде, прочно закрепляются органическим веществом почв. Поэтому следует предположить автохтонное обогащение почв данных районов, а также слабую интенсивность выщелачивания данных элементов в слабнокислой и близкой к нейтральной среде.

Содержание меди колеблется в рассматриваемых почвах от 8 до 250 мг/кг, в то время как фоновые показатели по Карелии составляют 63,4, а ПДК – 100, т. е. количество ее в почвах исследуемого района колеблется в широких пределах. В почвах буроземного типа, характеризующихся слабнокислой и близкой к нейтральной реакцией среды, накопление меди довольно высокое – 50–250 мг/кг, это касается указанных районов с высоким содержанием кобальта и никеля, а также района д. Палалега. В других обследованных местах содержание меди в почвах ниже и составляет от 8 до 60 мг/кг. Таким образом, содержание меди в отдельных точках, т. е. в почвах буроземного типа на шунгитах, превышает ПДК в 2–2,5 раза. По нашему мнению, это также автохтонное (аллохтонное) накопление цветных металлов.

Содержание цинка колеблется в исследованных почвах от 20 до 400 мг/кг абсолютно сухой почвы. Наибольшие показатели накопления цинка в почвах – в районе д. Шуньга, Зажогинского месторождения, Лебещина, д. Угольная, Палалега и Типиницы – от 120 до 400 мг/кг, т. е. в отдельных случаях превышает ПДК (300). В других обследованных районах содержание цинка значительно ниже. Указанные закономерности объясняются низкой подвижностью соединений цинка в буроземных почвах, характеризующихся слабнокислой или близкой к нейтральной реакцией среды.

Значительное содержание хрома отмечено лишь в районе деревень Типиницы и Угольная, колебания составляют 100–120 мг/кг, что равно 1 ПДК. В других местах количество хрома в 2–3 раза ниже. Содержание ванадия значительное везде (около 1 ПДК), особенно в нижних почвенных горизонтах. Лишь в отдельных точках его мало (Пуданцев бор и Карасозеро). В районе Белой Сельги, Горки и Ерковой Новинки в верхних органогенных почвенных горизонтах его немного, значительно меньше предельно допустимых концентраций, но уже в горизонте А1 – близко к 1 ПДК, составляющему 150 мг/кг.

Количество свинца в целом невелико, от 8 до 35 мг/кг, лишь в отдельных районах (Зажогинское месторождение, д. Никитская) содержание его составляет около 1,5 ПДК, что, по нашему мнению, связано с аэротехногенными выбросами автотранспорта.

Содержание стронция в целом ниже кларка и ниже фоновых концентраций для подзолистых почв в целом по России. Необходимо отметить, что накопление стронция в наибольших количествах выявлено в пахотных горизонтах, что связано, вероятно, с применением известковых материалов и минеральных удобрений, в первую очередь, суперфосфата, а также в нижележащих почвенных горизонтах в районе Белой Сельги и Карасозера, по-видимому, в связи со значительным его содержанием в материнских породах.

Отмечено значительное количество железа, содержание его колеблется от 0,7 до 6%. В лесных подстилках накапливается железа в 2 раза больше, чем в среднем по Карелии. Особенно высокие его показатели, превышающие кларк в 2–3 раза, наблюдаются в почвах, сформировавшихся на материнских породах, содержащих основные породы (габбро, диабазы).

Составлены карты распределения урана, ванадия в лесных подстилках и минеральных горизонтах ВС исследуемых почв по коэффициентам аномальности, рассчитанным по отношению к геохимическому фону для данного района, полученному нами экспериментальным путем (рис. 3.2). Содержание урана в лесных подстилках и минеральном горизонте ВС на большей части территории исследуемого района не превышает фоновые показатели для района в целом, т. е. коэффициент аномальности

равен единице, в отдельных местах ниже. Превышение фоновых концентраций выявлено для значительной территории на северо-востоке района (от Падмозера до Космозера): для подстилок – 2–2,5, для минеральных горизонтов – 1,5–2. Аномальные зоны расположены в районе Кузаранды и Холмов. Аномальное накопление ванадия в лесных подстилках и минеральных горизонтах почв отмечено в этих же районах, коэффициенты аномальности аналогичны.

Заключение

Исследован генезис и дана генетическая характеристика почв и почвенного покрова Заонежья. Установлено, что вся территория исследуемого района четко делится на две части по величине почвенной кислотности: западная характеризуется более высоким уровнем обменной кислотности, чем восточная, что связано с различными по генезису почвами, составляющими основной фон данных территорий. Восточной части района присуще распространение буроземов шунгитовых, развитых на шунгитовых сланцах и морене, обогащенной шунгитами и диабазами, в западной части преобладают оподзоленные и глеевые буроземы в сочетании с подзолистыми почвами легкого механического состава.

Установлены корреляционные взаимосвязи концентрирования в почвах свинца, цинка, кобальта, никеля, меди и железа и содержания органического вещества. Тесные корреляционные взаимосвязи выявлены между содержанием в почвах физической глины и накоплением кобальта, хрома, никеля, меди, цинка, свинца, железа и ванадия.

Выделено несколько классов радиальных геохимических барьеров в профиле исследуемых почв: сорбционные, связанные с прослойками более тяжелого механического состава в некоторых подзолистых почвах и с наличием элюво-делювий шунгитовых сланцев в профиле буроземных почв; восстановительно-глеевые – в буроземах глеевых; глеевые и органо-сорбционные – в гидроморфных почвах (торфяных и торфяно-глеевых). Барьеры в шунгитовых буроземных почвах названы нами шунгитовыми сорбционными. Таким образом, в почвенном покрове территории выделяются безбарьерные почвы (подзолы песчаные и супесчаные), однокбарьерные (подзолистые супесчаные, буроземы) и многобарьерные (гидроморфные).

Оценка распределения химических элементов по профилю почв различных типов в зависимости от величины кислотности, гранулометрического состава, содержания гумуса и наличия геохимических барьеров показала следующее: равномерным распределением с поверхности до более глубоких горизонтов почвы характеризуются никель и хром. Сниже-

ние концентрации с глубиной типично для свинца. Увеличивается с глубиной количество ванадия и кобальта, в меньшей степени – меди. Цинк в отдельных случаях накапливается с глубиной при снижении почвенной кислотности.

Высокой сорбирующей способностью обладают темноцветные шунгитовые почвы, имеющие сорбционно-шунгитовые барьеры. У всех почв, содержащих значительное количество шунгитов в почвенном профиле, высокая удерживающая способность относительно тяжелых металлов. Это же можно отметить и для многобарьерных почв. Безбарьерные почвы характеризуются выносом тяжелых металлов в нижележащие горизонты.

Исследования особенностей накопления и латеральной миграции элементов показали, что в контрастных сопряжениях большинства определенных химических элементов довольно прочно закреплено в темноцветных буроземах. Для катен, состоящих из песчаных подзолистых и перегнойно-глеевых почв и охарактеризованных как сильноконтрастные, отмечено накопление большинства элементов в перегнойно-глеевых почвах с их восстановительными условиями, слабокислой реакцией среды и многобарьерностью.

Поконтурное описание щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных условий на территории Заонежья позволило выявить для восьми почвенных сочетаний, имеющих на почвенной карте, ведущие латеральные барьеры.

Богатые углеродом и обладающие высокой сорбционной способностью шунгитсодержащие почвы, распространенные в восточной части обследованного нами района, способны сорбировать тяжелые металлы при их техногенном поступлении. Подзолистые почвы песчаного механического состава, распространенные, в основном, на западной территории района, практически не закрепляют тяжелые металлы, и существует угроза их просачивания в нижележащие горизонты и в грунтовые воды. Накопление микроэлементов в почве увеличивается от песчаных к глинистым, слабопроницаемым и с большой водоудерживающей способностью, а также к органогенным торфяным почвам.

Характер антропогенного освоения территории: наличие аэротехногенных выбросов в атмосферу, воздействие автотранспорта – оказывает существенное влияние на свойства почв и уровень их загрязнения. Так, в пахотных горизонтах многих почв отмечается накопление стронция, что связано, на наш взгляд, с внесением извести и минеральных удобрений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 03-04-48014.

Литература

- Агроклиматические ресурсы Карельской АССР, 1974. Л.: Метеоиздат. 115 с.
- Виноградов А. П., 1957. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР. 237 с.
- Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В. и др., 1995. Экосистемы ландшафтов запада северной тайги (структура, динамика). Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 194 с.
- Гаврилова И. П., Касимов Н. С., Павленко И. А., Побединцева И. Г., 1983. Почвенно-геохимическое районирование срединного региона по условиям миграции микроэлементов // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. М. С. 169–183.
- Глазовская М. А., 1972. Почвы мира. М.: МГУ. Т. 1. 231 с.; Т. 2. 436 с.
- Глазовская М. А., 1981. Теория геохимии ландшафтов в приложении к изучению техногенных потоков рассеяния и анализу особенности природных систем к самоочищению // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М. С. 7–41.
- Глазовская М. А., 1983. Прикладное и общее (базовое) ландшафтно-геохимическое районирование // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. М. С. 11–18.
- Голубев А. И., 1999. Геологическое строение района заказника «Кижские шхеры» // Острова Кижского архипелага. Биогеографическая характеристика: Тр. Карельского научного центра РАН, сер. «Биогеография Карелии». Вып. 1. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 4–10.
- Добровольский В. В., 2003. Основы биогеохимии. М.: Academia. 397 с.
- Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды, 1983. М.: Мысль. 206 с.
- Кратц К. О., 1963. Геология карелид Карелии. М.; Л.: Наука. 210 с.
- Ладонин Д. В., 2002. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. № 6. С. 683–692.
- Лукашов А. Д., Демидов И. Н., 2001. Условия формирования рельефа и четвертичных отложений Карелии в поздне- и послеледниковые как основа становления современной природной среды // Биогеография Карелии: Тр. Карельского научного центра РАН, сер. «Биология». Вып. 2. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 3–11.
- Морозова Р. М., 1991. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука. 184 с.
- Морозова Р. М., Лазарева И. П., 2002. Почвы и почвенный покров Валаамского архипелага. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 169 с.
- Перельман А. И., 1989. Геохимия. М.: Высшая школа. 527 с.
- Рэуце Ж., Кырстя С., 1986. Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат. 222 с.
- Федорец Н. Г., 2001. Фоновый мониторинг лесных почв в среднетаежной подзоне Карелии // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 20–37.
- Федорец Н. Г., Дьяконов В. В., Литинский П. Ю., Шильцова Г. В., 1998. Загрязнение лесной территории Карелии тяжелыми металлами и серой. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 47 с.
- Федорец Н. Г., Морозова Р. М., Синькевич С. М., Загуральская Л. М., 2000. Оценка продуктивности лесных почв Карелии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 194 с.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ ЗАОНЕЖСКОГО ПОЛУОСТРОВА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ

П. А. ЛОЗОВИК, М. И. БАСОВ, М. Б. ЗОБКОВ

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

По результатам гидрохимических исследований, выполненных в 1999–2001 гг. на водных объектах Заонежского полуострова, дана характеристика химического состава воды, включая макро-, микрокомпоненты и радионуклиды. Установлено, что поверхностные воды Заонежья выделяются среди вод региона прежде всего повышенными минерализацией, щелочностью и трофностью при низком содержании органического вещества в озерах и высоком – в реках. Исследование микрокомпонентного состава показало, что содержание металлов-микроэлементов находится на уровне регионального фона, и только в водных объектах, примыкающих к уран-ванадиевому месторождению Средняя Падма, выявлено несколько большее содержание U, V и ряда других металлов (Cr, Pb, Ni и пр.), чем фоновое, но их концентрация ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Суммарная α -активность достаточно низкая ($<0,02$ Бк/л) при допустимой для питьевых целей 0,1 Бк/л. В естественных условиях рудопроявление не сказывается на содержании многих элементов, а на качественных и количественных характеристиках природных вод Заонежья в большей степени отражаются особенности геолого-геоморфологического строения его территории.

P. A. LOZOVIK, M. I. BASOV, M. B. ZOBKOV. SURFACE WATERS OF ZAONEZHYE. A CHEMICAL COMPOSITION OF WATER

Results of hydrochemical researches executed in 1999–2000 on objects in Zaonezhye are given. The review contains information about chemical composition, macro-, microelements, and radionuclides. Surface waters of Zaonezhye are different to another waters of Karelia region by an increased mineralization, alkalinity, and trophic status, low level of organic substance in lakes and higher one in rivers. Researching of micro-components showed the content of metals – microelements satisfied to level of regional background. There are some more than regional background content such metals as U, V, Cr, Pb, Ni and some others in the water objects placed closed to the uranium-vanadic deposit Srednyaya Padma, but it's significant is lower than permissible limit concentration for piscicultural reservoirs. Total α -activity is low enough (<0.02 Bk/l) as allowable to the drinking purposes (0.1 Bk/l). In natural conditions ore-deposits does not have any significant effect to the surface water composition. Main influence to natural surface water characteristics of Zaonezhye is given by geologic and geomorphologic structure's peculiarity of this territory.

Ключевые слова: поверхностные воды, Заонежье, состав воды.

Гидрохимические исследования водных объектов Заонежского полуострова были проведены в 1999–2001 гг. в рамках темы «Геоэкологическое районирование Онежского рудного района» и по программе государственного мониторинга водной среды Карелии. Материалы, полученные в рамках этих тем, а также фондо-

вые и литературные сведения (Харкевич, 1965) легли в основу данной работы. Главное внимание было уделено водным объектам, расположенным вблизи уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма и Зажогинского месторождения шунгитов. Всего за указанный период было обследовано 59 водных объектов,

относящихся к 34 водосборам, проанализировано 163 пробы поверхностных вод. Фактическими наблюдениями были охвачены почти все водосборы Заонежского полуострова. Наиболее детально изучалось распределение макрокомпонентов, органического вещества и биогенных элементов для общей характеристики водоемов и установления их геохимических классов вод, а также распределение микрокомпонентов (тяжелых металлов, радионуклидов) для выявления геохимических аномалий. Для оценки качества воды, современного состояния водных объектов использовались критерии ПДК для рыбохозяйственных водоемов и питьевых вод, а также степень отклонения показателей от региональных фоновых величин.

Целью работ было выявить геохимические особенности поверхностных вод Онежского рудного района. В задачу исследований входили характеристика химического состава воды и установление геохимических аномалий, связанных с рудопоявлением, а также оценка возможного влияния добычи руды на водные объекты.

Общие гидрологические сведения

Заонежский полуостров ограничен на западе и северо-западе бассейном р. Уницы, на севере и северо-востоке – Повенецким заливом Онежского озера, на востоке – Заонежским заливом, на юге – Великой губой и заливом Большое Онего.

Типичной чертой рельефа является частое чередование нешироких и длинных гряд, сложенных преимущественно твердыми доретвертными породами с узкими понижениями. Котловины озер вытянуты согласно с направлением основных разломов – с северо-запада на юго-восток. Характерным примером озер, заполнивших тектонические трещины, являются Путкозеро, Космозеро и Ладмозеро.

К участкам основных тектонических разломов приурочены провальное-тектонические котловины Ладмозера, Путкозера, Космозера. Они характеризуются чередованием узких щелей и ям с участками спокойного подводного рельефа. Встречаются также котловины тектонического происхождения, преобразованные ледником – тектонико-ледниковые котловины (Вангозеро, Падмозеро). В Заонежье представлен также тип ледниковых котловин, рас-

положенных на моренных волнистых равнинах (Верхнее и Нижнее Пигмозеро), среди грядового рельефа (Мягрозеро) и на заболоченных равнинах южной части полуострова (Яндомозеро).

Заонежский полуостров расположен в области восточной окраины Балтийского кристаллического щита. Доретвертные образования представлены карбонатными породами протерозойского возраста, разнообразными сланцами, включая шунгитовые образования. Верхняя морена, имеющая почти повсеместное распространение, состоит из песчаной фракции (около 60%) и равного содержания илисто-пылеватой и гравийно-галечной фракции (10–15%).

Гидрографическая сеть развита по всей территории довольно равномерно, за исключением крайней юго-восточной части, где она выражена слабее (рис. 4.1). Представлена она небольшими по длине и объему стока водотоками (табл. 4.1).

Модуль стока для данного района 10 л/с с 1 км². По величине общего падения реки можно отнести к равнинным. Озерность района сравнительно небольшая – 8%.

В районе Заонежья на площади 1900 км² расположено 251 озеро с суммарной площадью 212 км² (менее 1% от общей площади озер Карелии) (Фрейндлинг, Поляков, 1965).

Одной из особенностей озер Заонежья в гидрологическом отношении является весьма малый их удельный водосбор (2–18) и достаточно замедленный водообмен (от 1 года до 10 лет) (табл. 4.2), что связано с высокой расчлененностью рельефа. Поэтому в режиме этих озер следует ожидать существенную роль атмосферных осадков в водном питании и внутриводоемных процессов в формировании химического состава воды.

Химический состав воды

Гидрохимические исследования, как уже отмечалось, были проведены на водных объектах Заонежского полуострова в 1999–2001 гг. по схеме станций, представленных на рис. 4.2. В целом наблюдениями было охвачено 34 водосбора, включающих 59 водных объектов (табл. 4.3). Полнота обследования бассейнов и сезонность наблюдений на водоемах и водотоках в связи с ограниченностью средств были весьма различны. Так, условно можно считать,

Таблица 4. 1. Гидрологические показатели основных рек Заонежья

Река	Площадь водосбора, км ²	Расход воды, м ³ /с	Протяжение, км	Общее падение, м	Коэффициент озерности (средн.), %
Уница	394,3	3,86	56,7	141,4	2,4
Пигмозерка	192,9	1,74	30,8	82,0	13,3
Яндома	105,2	1,04	4,2	9,2	32,6
Падмозерка	105,3	1,04	23,6	42,0	10,0
Путкозерка	221,2	2,20	44,4	32,0	15,1
Кулома (Муна)	212,0	2,12	29,4	56,4	21,0
Карасозерка	127,1	1,27	30,3	66,1	18,1

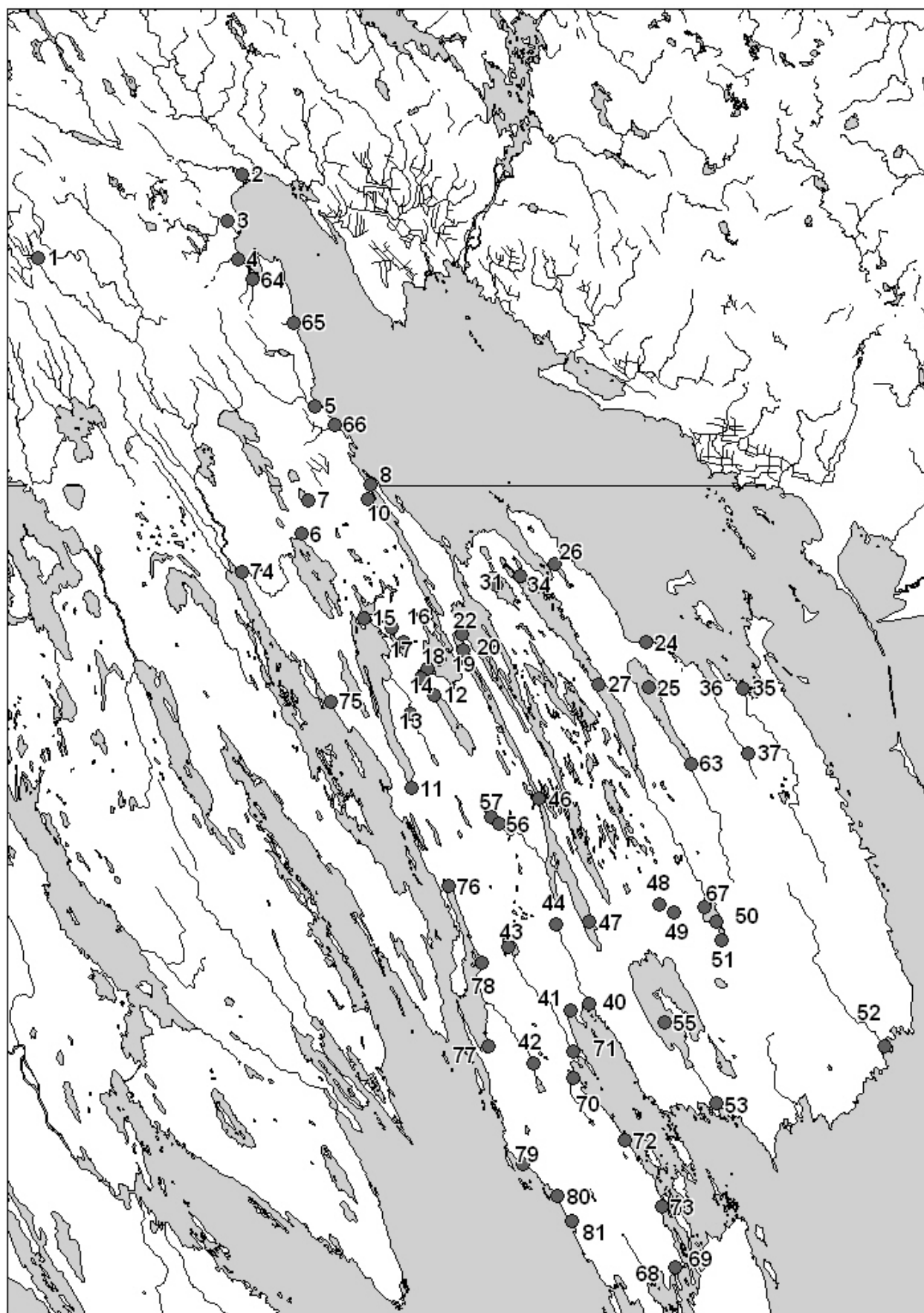


Рис. 4.2. Схема размещения станций мониторинга на водных объектах Заонежья

Таблица 4.2. Гидрологические показатели некоторых озер Заонежья

Озеро	Площадь зеркала, км ²	Глубина, м		Объем водной массы, км ³	Площадь водосборного бассейна, км ²	$\Delta F_{уд.}$	Коэффициент условного водообмена, $V_{пр}/V_{оз.}$
		средняя	наибольшая				
Яндомозеро	31,7	4,0	6,0	0,13	96,9	2,1	0,24
Ладмозеро	24,8	15,1	52,0	0,38	119,9	3,8	0,10
Путкозеро	24,0	14,2	42,0	0,33	204,2	7,5	0,19
Космозеро	22,1	7,1	25,0	0,16	126,5	4,7	0,25
Н. Пигмозеро	13,8	3,8	11,6	0,05	144,4	9,5	0,85
Падмозеро	11,6	3,5	14,9	0,04	100,0	7,6	0,78
Вангозеро	10,9	6,2	22,0	0,07	211,9	18,4	0,98
В. Пигмозеро	11,4	3,6	7,0	0,04	104,1	8,1	0,80
Мягрозеро	5,1	5,6	9,9	0,03	21,2	3,2	0,23
Валгомозеро	3,4	8,6	17,1	0,03	13,8	3,1	0,15

что сезонные съемки были проведены на озерах Падмозеро, Пуккозеро, Ладмозеро, Турастомозеро, В. Мягрозеро, Вангозеро, Валгомозеро, Яндомозеро, Космозеро и реках Унице, Путкозерке, Падмозерке, Падме, Царевке, Калей, Антоновщине, поскольку они были выполнены в разные годы (в сентябре 1999 г., августе 2000, марте 2001, июне 2001 г.). На остальных объектах проводились только разовые съемки в разные годы и сезоны: на реках Кумса, Вакшозерка, Григоручей, Макушиха-Тунат – в сентябре 1999 г., водосборах 6, 7, 9 – в августе 2000 г., на реках и ручьях юго-западной части Заонежья (Вожмариха, руч. в д. Телятниково, Судма, Лельречка, руч. Пижей, руч. Горный, руч. из оз. Вехкозеро, М. Пигма, Юнозерка, руч. из оз. Мижозеро, руч. в д. Вегаруксы, Маткозерка, руч. в д. Ламбасручей, руч. в д. Узкие Салми, водосбор 28, 29) – октябре 2000 г., в устьевой части непосредственно с НИС «Посейдон». Необходимо также учитывать то обстоятельство, что разные годы наблюдений отличались по водности, особенно аномальной была осень 1999 г., когда было проведено обследование значительного количества водных объектов. Летом этого года и к моменту наблюдений осенью практически не было дождей, и многие водотоки перешли на подземное питание, как это имело место в р. Антоновщине. Поэтому, с учетом особенностей проведенных наблюдений, следует отметить, что имеющиеся данные не позволяют в полной мере дать характеристику всех водосборов Заонежского полуострова, но в то же время их достаточно для выявления общей картины состояния водных объектов.

Отбор проб воды проводился металлическим батометром Рутнера на общий химический анализ, а для определения металлов использовались только специальные пробоотборники и посуда. Большинство химических анализов было выполнено в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, имеющей аккредитацию Госстандарта России. Определение некоторых металлов было осуществлено в центральной лаборатории Института исследования окружающей среды в Финляндии, а также методом ICP MS в лаборатории АО «Инструмент» (С.-Петербург).

Таблица 4.3. Перечень водных объектов, обследованных в 1999–2001 гг.

Водосбор	Водный объект и номер станций на рис. 4.2
01	р. Кумса (2)
02	р. Уница (1)
04	р. Вакшозерка (3)
05	руч. Григоручей (4)
06	руч. Безымянный (64)
07	руч. Безымянный (65)
08	р. Макушиха-Тунат (5)
09	руч. Безымянный (66)
10	протока В. – Н. Пигмозеро (6), ламба (7), р. М. Пигма (74)
11	р. Юнозерка (75)
12	р. Муна (13), оз. Ладмозеро (11, 15), оз. Турастомозеро (16, 17), оз. В. Мягрозеро (14), протоки В. – Н. Мягрозеро (12), Н. Мягрозеро – Вангозеро (15), оз. Вангозеро (19)
13	р. Карасозерка (57), оз. Карасозеро (56), оз. Космозеро (26, 46, 47), р. Кажма (22)
14	р. Путкозерка (38), оз. Путкозеро (27, 34, 35), оз. Хашозеро (26), оз. Валгомозеро (31), ламба (39), ламба (51), ручей из ламбы в оз. Кереецкое (50), протока оз. «Поля» – Кереецкое (49), оз. «Поля» (48), оз. Кереецкое (67)
15	оз. Падмозеро (25), р. Падмозерка (63), р. Падма (24)
16	р. Царевка (36, 37)
17	руч. Калей (35)
18	р. Тамбица (52)
21	р. Яндома (53), оз. Яндомозеро (55)
22	р. Судма (40, 44)
23	р. Антоновщина (41)
24	оз. Леликозеро (43), р. Лельречка (71)
25	руч. Пижей (70)
26	руч. из оз. Вехкозеро (73)
27	р. Важмариха (68)
28	руч. из болота Б. Мох (81)
29	руч. безымянный (80)
30	руч. из оз. Кугозеро (77)
31	р. Маткозерка (42)
32	руч. из оз. Мижозеро (76)
35	руч. в д. Телятниково (69)
36	руч. Горный (Звонецкие о-ва) (72)
37	руч. в д. Ламбасручей (78)
38	руч. в д. Узкие Салми (79)
39	оз. Калозеро (82), оз. Ковкозеро (83)

МИНЕРАЛИЗАЦИЯ, ИОННЫЙ И ГАЗОВЫЙ СОСТАВ ВОДЫ

Данные по ионному составу воды ряда объектов, на которых проводились сезонные наблюдения, представлены в табл. 4.4 и 4.5,

Таблица 4.4. Минерализация, ионный состав, щелочность (средние значения за четыре периода наблюдений), pH и кислород в водоемах Заонежья

Водоем	pH	Alk, мг HCO ₃ ⁻ /л	O ₂ , % нас.	$\Sigma_{и}$		Ионный состав, %-экв.	Класс щелочности
				мг/л	ммоль/л		
Космозеро	6,87–7,56	29,8	35–97	50,3	0,73	<u>Ca44 Mg33 Na20 K3</u> HCO ₃ 67 Cl12 SO ₄ 11 A _{орг} 10	средне
Путкозеро	7,05–7,80	48,8	38–102	87,8	1,25	<u>Ca47 Mg40 Na10 K3</u> HCO ₃ 64 SO ₄ 22 A _{орг} 7 Cl7	средне
Падмозеро	7,05–8,03	99,5	6–91	150,8	1,99	<u>Ca58 Mg34 Na6 K2</u> HCO ₃ 82 SO ₄ 8 A _{орг} 7 Cl3	высоко
Ладмозеро	7,23–7,80	28,6	76–102	46,3	0,66	<u>Ca59 Mg28 Na11 K3</u> HCO ₃ 71 SO ₄ 14 A _{орг} 9 Cl6	средне
Турастомозеро	6,70–8,10	29,8	10–102	46,7	0,67	<u>Ca60 Mg27 Na11 K2</u> HCO ₃ 73 SO ₄ 12 A _{орг} 10 Cl5	средне
В. Мягрозеро	7,25–8,03	74,6	59–102	108,0	1,51	<u>Ca76 Mg19 Na4 K1</u> HCO ₃ 81 A _{орг} 12 SO ₄ 5 Cl2	высоко
Вангозеро	6,85–7,80	38,1	17–98	58,6	0,78	<u>Ca63 Mg25 Na10 K2</u> HCO ₃ 80 SO ₄ 11 A _{орг} 5 Cl4	средне
Валгомозеро	7,15–8,15	85,6	15–95	124,3	1,80	<u>Ca59 Mg28 Na8 K5</u> HCO ₃ 78 SO ₄ 10 A _{орг} 6 Cl6	высоко
Яндомозеро	6,86–7,55	24,2	74–102	42,2	0,62	<u>Ca45 Mg38 Na14 K3</u> HCO ₃ 64 SO ₄ 17 A _{орг} 12 Cl7	средне
Губы Онежско-го озера	7,16–7,95	29,8	89–105	45,4	0,67	<u>Ca50 Mg33 Na15 K2</u> HCO ₃ 73 SO ₄ 12 A _{орг} 9 Cl6	средне

Таблица 4.5. Минерализация, ионный состав, щелочность (средние значения за четыре периода наблюдений), pH и кислород в водотоках Заонежья

Водоток	pH	Alk, мг HCO ₃ ⁻ /л	O ₂ , % нас.	$\Sigma_{и}$		Ионный состав, %-экв.	Класс щелочности
				мг/л	ммоль/л		
Уница	6,62–7,20	15,7	60–86	29,8	0,56	<u>Ca51 Mg31 Na15 K3</u> HCO ₃ 46 A _{орг} 41 Cl8 SO ₄ 5	средне
Путкозерка	6,70–7,20	68,7	6–60	134,0	2,01	<u>Ca49 Mg38 Na11 K2</u> HCO ₃ 56 SO ₄ 23 A _{орг} 12 Cl9	средне
Падмозерка	6,70–7,90	97,0	80–91	142,0	1,94	<u>Ca57 Mg35 Na6 K2</u> HCO ₃ 82 SO ₄ 8 A _{орг} 7 Cl3	высоко
Падма	7,52–7,80	111	75–84	153,8	2,06	<u>Ca58 Mg36 Na7 K1</u> HCO ₃ 88 A _{орг} 7 SO ₄ 3 Cl2	высоко
Царевка	7,56–7,75	182	60–81	358,0	4,52	<u>Ca63 Mg31 Na5 K1</u> HCO ₃ 66 SO ₄ 13 Cl6 A _{орг} 5	высоко
Калей	7,19–7,75	135	35–71	243,8	3,81	<u>Ca57 Mg35 Na6 K2</u> HCO ₃ 58 SO ₄ 20 A _{орг} 18 Cl4	высоко
Антоновшина	6,39–6,70	38,4	41–61	85,4	1,43	<u>Ca46 Mg30 Na23 K1</u> HCO ₃ 44 A _{орг} 38 Cl11 SO ₄ 7	средне

а распределение $\Sigma_{и}$ по всем обследованным озерам и водотокам – на рис. 4.3. Повышенной минерализацией (88–150 мг/л) отличаются озера восточного Заонежья: Путкозеро, Падмозеро, Мягрозеро, Хашозеро, Валгомозеро. Реки этого района Царевка и Калей, а также Тамбица на юго-востоке полуострова имеют еще большую сумму ионов (244–358 мг/л). Не-высокая минерализация отмечена в Леликозере, Карасозере (20,7–26,3 мг/л) и реках Юнозерка, Пижей, Горный на западе полуострова. В остальных озерах и реках вода по минерализации близка к онежским заливам, омывающим полуостров. Вода в большинстве водных объектов – гидрокарбонатного класса, группы кальция.

Из числа обследованных озер и рек к высокощелочным слабощелочным относятся 14 водных объектов (озера Падмозеро, В. Мягрозеро, Н. Мягрозеро, Валгомозеро, Хашозеро, Кереецкое, реки Падмозерка, Падма, Калей, Царевка, Муна, Тамбица, Григоручей, ручей из ламбы около оз. Кереецкого) (Alk – 58–244,

в среднем 106 мг HCO₃⁻/л; pH 7,1–8,2), к низкощелочным слабокислотно-нейтральным – 11 объектов и только небольшие речки (Вожма-риха, Лельречка, М. Пигма, Пижей, Горный, Юнозерка) и ручьи водосборов 7, 26, 29, 30, 35 (Alk – 5,6–18,6, в среднем 11 мг HCO₃⁻/л; pH 6,2–6,6). В воде последних среди анионов преобладают органические, и их воды относятся к карбоксилатному классу. Все остальные объекты соответствуют среднещелочному циркумнейтральному классу (Alk – 12–69, в среднем 29 мг HCO₃⁻/л, pH 6,4–7,6) по разработанной в ИВПС КарНЦ РАН классификации поверхностных вод (Lozovik et al., 2001) (рис. 4.4).

По минерализации воды, отражением которой является в поверхностных водах их щелочность, водные объекты Заонежья выделяются на фоне среднерегionalных величин (Alk – 7,6 мг HCO₃⁻/л, $\Sigma_{и}$ – 19,4 мг/л, медианное значение) прежде всего повышенными их значениями. Последнее следует отнести на счет геологических особенностей Заонежского полуострова и главным образом наличия карбонатных

пород. И только западные реки, дренирующие наиболее заболоченную часть территории, имеют близкие к среднерегionalным значения показателей щелочности и минерализации воды (см. рис. 4.3, 4.4). Как следствие названных особенностей поверхностные воды Заонежья и губы Онежского озера, глубоко врезающиеся в полуостров, имеют большую минерализацию (45,4 мг/л) и щелочность (29,8) воды по сравнению с Онежским озером ($\Sigma_{\text{и}} - 36,5$ мг/л, $\text{Alk} - 20,1$ мг $\text{HCO}_3^-/\text{л}$).

Содержание кислорода в большинстве проб воды изменялось в пределах 60–105%, что является типичной картиной для поверхностных вод региона. В то же время на тех объектах, где были проведены сезонные наблюдения, был установлен существенный дефицит кислорода в придонных слоях воды. В частности, это наблюдалось в озерах Турастомозеро (около 100 на поверхности во все сезоны года и 8–10% у дна летом, зимой), Валгомозеро (95–19%), Вангозеро (92–18%), а также зимой в Падмозере (75–6%) и летом в Космозере (89–35) соответственно. Названные озера следует отнести к кислороддефицитным в придонных слоях воды в период летней и зимней стагнаций. Очень низкое содержание кислорода наблюдалось в оз. Керецком в зимний период (около 3%). Данное озеро мелководное, и зимой почти полностью потребляется весь кислород на окисление органических веществ в воде и донных отложениях, и в нем возможны заморные явления. Весьма низкое содержание кислорода было отмечено и в р. Путкозерке (6%) в марте 2000 г., что связано с переходом ее в этот период на чисто подземное питание. Аналогичная картина и по тем же причинам наблюдалась в руч. Калей (35%) и р. Антоновщине (41%) летом 2000 г.

Что касается углекислого газа, то изменчивость его концентрации противоположна кислороду. Так, при равновесно насыщенном содержании кислорода (80–105%) концентрация

CO_2 изменялась в пределах 1–6 мг/л, а при снижении количества кислорода (до 10%) увеличивалась до 20 мг/л. Особенно контрастным содержанием CO_2 выделялись реки при переходе их на подземное питание (Путкозерка – 33, Царевка – 105, Антоновщина – 28 мг/л).

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО И ЛИТОФИЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (Fe, Si, Mn)

Косвенные показатели содержания органического вещества, железа и кремния в поверхностных водах Заонежья представлены в табл. 4.6, а степень их гумусности – на рис. 4.5. Содержание органического вещества в большинстве объектов невысокое. Из водоемов оно несколько выше в Падмозере (цветность – 37 град., ПО – 13,2 мг О/л) и Яндомозере (цветность – 16, ПО – 11,1) и наиболее высокое – в оз. Керецком (цветность – 180 град., ПО – 28 мг О/л). В последнем это связано с высокой заболоченностью водосбора и его мелководностью. Во всех водотоках органического вещества значительно больше, чем в озерах, и особенно в реках Антоновщине, Юнозерке, Маткозерке (цветность – до 200 град., ПО – до 44,6 мг О/л, БПК₅ – до 5,7 мг О₂/л). Легкоокисляющиеся органические вещества присутствуют в небольших количествах, величина БПК₅ не превышает 1,5 мг О₂/л, за исключением вышеупомянутой р. Антоновщины. Из всех водотоков очень низким содержанием ОВ выделяются р. Муна (цветность – 20 град., ПО – 8,4 мг О/л) и Григоручей (цветность – 5 град., ПО – 2,5 мг О/л), что, по-видимому, связано с геолого-геоморфологическими особенностями их водосборов.

Содержание Fe в водоемах и водотоках Заонежья изменяется в весьма широких пределах (<0,01 до 2,3 мг/л) (рис. 4.6). Наименьшее его количество отмечено в низкогумусных водных объектах и наибольшее – в высокогумусных, а также в придонных слоях воды в озерах при создании существенного дефицита кислорода,

Таблица 4.6. Показатели содержания органического вещества и литофильных элементов в водах Заонежья

Водный объект	Цветность, град.	ПО, мг О/л	БПК ₅ , мг О ₂ /л	Mn _{общ} , мг/л	Fe _{общ} , мг/л	Si, мг/л	Hum	Класс гумусности
Космозеро	11	9,2	0,47	0,07	0,06	2,34	10	олиго
Путкозеро	8	7,4	0,60	0,03	0,13	1,09	8	олиго
Падмозеро	37	13,2	1,02	0,09	0,55	1,65	22	мезо
Ладмозеро	5	6,5	0,47	0,01	0,04	1,23	6	ультраолиго
Турастомозеро	8	8,2	0,52	0,03	0,15	1,20	8	олиго
В. Мягрозеро	5	5,0	0,61	0,04	0,04	1,91	5	ультраолиго
Вангозеро	6	5,0	0,69	0,07	0,16	2,05	5	олиго
Валгомозеро	6	3,5	0,64	0,03	0,04	0,98	5	ультраолиго
Яндомозеро	16	11,1	1,13	0,10	0,19	0,83	13	мезо
р. Уница	169	24,9	0,95	0,13	1,62	1,73	65	мезополи
р. Путкозерка	121	22,9	1,26	0,20	1,36	2,19	53	мезополи
р. Падмозерка	23	10,4	0,90	0,09	0,11	0,73	15	олиго
р. Падма	107	27,1	0,76	0,10	0,73	2,87	54	мезополи
р. Царевка	75	22,8	1,26	0,08	0,61	3,83	41	мезополи
руч. Калей	152	36,8	0,90	0,10	0,83	3,18	75	мезополи
р. Антоновщина	200	44,6	2,63	0,15	1,93	2,23	94	поли

Примечание. $\text{Hum} = \sqrt{\text{ЦВ} \cdot \text{ПО}}$ (среднегеометрическое значение цветности и перманганатной окисляемости).

что типично для поверхностных вод Карелии, и Заонежье в этом плане не является исключением.

Концентрация кремния в озерах колебалась от 0,2 до 2,3 мг/л, в реках – несколько шире (от 0,4 до 5,9 мг/л), что также характерно и для других районов Карелии. Более низкое содержание Si в озерах по сравнению с реками связано с внутриводоемными процессами потребления кремния планктоном и захоронением его в донных отложениях. В озерах с существенной долей атмосферного питания, как, например, в Леликозере, это объясняется еще и малым поступлением кремния с осадками на поверхность озера.

По содержанию органического вещества гумусовой природы, отражением которого является и концентрация Fe, водные объекты Заонежья можно подразделить на следующие классы (см. рис. 4.5):

- ультраолигогумусные (озера: Ладмозеро, В. Мягрозеро, Вангозеро, Леликозеро, Калозеро; водотоки: Григоручей, Кажма и др.) (в среднем показатель гумусности (Hum) составляет 6 ед., а концентрация Fe – 0,02 мг/л);
- олигогумусные (озера: Космозеро, Путкозеро, Турастомозеро, Вангозеро, Хашозеро, Карасозеро, ламбы у озер Путкозеро и Керещкое, реки: Муна, Падмозерка, Кумса, Тамбица, Яндомо и др.) (Hum – 12, Fe – 0,11 мг/л);
- мезогумусные (озера: Падмозеро, Яндомозеро, В. Пигмозеро, Ковкозеро, р. Макушиха-Тунат, ручьи из Мижозера и ламбы вблизи оз. Керещкого и др.) (Hum – 28, Fe – 0,61 мг/л);
- мезополигумусные (реки: Уница, Путкозерка, Падма, Царевка, Калей, водосборов 6, 7, Вожмариха, Судма, Лельречка, М. Пигма, оз. Поля, ручьи из оз. Вехкозеро и в населенных пунктах Телятниково, Ламбасручей, Узкие Салми и др.) (Hum – 65, Fe – 0,84 мг/л);
- полигумусные (реки: Антоновщина, Юнозерка, Маткозерка, водосборов 9, 29, руч. Пижей, оз. Керещкое) (Hum – 104, Fe – 1,3 мг/л).

В целом из числа обследованных объектов к ультраолигогумусным относятся 10, олигогумусным – 15, мезогумусным – 7, мезополигумусным – 20, полигумусным – 7. По средним показателям водоемы и водотоки Заонежья, как и во всей Карелии, тяготеют к переходной границе между мезо- и мезополигумусными классами вод. Большинство озер в связи с их замедленным водообменом и существенным вкладом седиментационных процессов в трансформацию ОВ и Fe соответствуют низкогумусным, а реки – высокогумусным типам вод.

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К одним из важных компонентов состава воды относятся биогенные элементы, от содержания которых зависит продуктивность водных экосистем. Для поверхностных вод наиболее значимым в лимитировании продукционных

процессов является фосфор. Содержание фосфора общего изменяется в очень широких пределах – от 5 до 70 мкг/л (табл. 4.7). В то же время доля минерального была достаточно низкой (менее 20% от общего), поэтому фосфор в водных объектах Заонежья представлен в основном в виде связанных форм: с железом в составе гумусовых веществ и с органическими соединениями. Учитывая низкую долю минерального фосфора от общего, можно предположить, что обеспеченность водных объектов фосфором в большей степени связана с природными факторами, а не с антропогенными. Условность этого суждения связана с отсутствием полноты сезонных данных по всем объектам Заонежья.

В распределении азотистых веществ наблюдается большей частью следующая картина:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{N-NO}_2 & << & \text{N-NH}_4^+ & < & \text{N-NO}_3^- & < & \text{N}_{\text{орг}} \\ & <0,001 & 0,05 & & 0,1 & & 0,67 \text{ мг/л}, \end{array}$$

она достаточно типична в целом для поверхностных вод Карелии с «гумусным» соотношением форм азота. В то же время следует отметить несколько повышенную долю нитратного азота и азота органического по сравнению с их среднерегиональными величинами (N-NO_3^- – 0,01, $\text{N}_{\text{орг}}$ – 0,44 мг/л). В стратифицированных озерах летом наблюдается полное потребление нитратов в поверхностных слоях и увеличение их содержания в придонных при сохранении суммы азотистых веществ. С учетом газового режима в ряде озер и распределения форм азота следует, что водные объекты Заонежья характеризуются повышенной трофией. Более детальный анализ распределения фосфора общего как раз и выявляет указанное обстоятельство (рис. 4.7). Так, к ультраолиготрофным объектам относится всего два, и, как ни странно, реки (Вакшозерка и Григоручей). К олиготрофным также небольшое число – четыре (озера Ладмозеро, Турастомозеро, Н. Мягрозеро, р. Муна). Подавляющее количество объектов соответствует мезотрофному (57,6% от числа обследованных) и евтрофному (27,1%) уровню. К высокоевтрофным причислена только р. Антоновщина, руч. водосбора 9 и оз. Керещкое. Последнее озеро ввиду мелководности следует считать как морфометрически евтрофное. Указанная особенность трофии водоемов и водотоков Заонежья согласуется с общей закономерностью, установленной для региона: содержание фосфора в водных объектах увеличивается с ростом щелочности и гумусности воды. Большинство рек Заонежья высокогумусные, средне-высокощелочностные, поэтому в них наблюдаются повышенные концентрации фосфора общего. В озерах, несмотря зачастую на низкое содержание ОВ, но в то же время высокую щелочность, не происходит удаления фосфора из воды за счет седиментационных процессов до уровня низкотрофных водоемов.

Таблица 4.7. Показатели содержания биогенных элементов в водах Заонежья (средние значения за четыре периода наблюдений), мкг/л

Водный объект	P _{общ}	P _{мин}	N _{орг} , мг/л	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NO ₂	Класс трофности
Падмозеро	20,9	0,5	0,55	90	$\frac{30-230}{98}$	1,2	мезо
Путкозеро	19,5	1,4	0,50	30	$\frac{30-130}{77}$	0,4	мезо
Ладмозеро	6,3	0,3	0,31	20	$\frac{0-60}{24}$	0,5	олиго
Турастомозеро	10,2	1,9	0,32	60	$\frac{0-266}{128}$	0,8	олиго
В. Мягрозеро	10,0	0,2	0,33	20	$\frac{0-105}{61}$	0,2	мезо
Вангозеро	11,9	4,2	0,36	20	$\frac{0-150}{70}$	0,8	мезо
Валгомозеро	16,9	1,0	0,34	30	$\frac{0-123}{51}$	1,0	мезо
Яндомозеро	28,4	0,1	0,51	30	$\frac{0-480}{230}$	0,2	евтроф.
Космозеро	12,8	0,1	0,42	20	$\frac{0-120}{72}$	0,1	мезо
Средние	15,2	1,1	0,40	40	$\frac{0-480}{90}$	0,6	мезо
Губы Онежского озера	8–12	0–0,4	0,28–0,39	10–50	0–360	0–0,5	олиго
р. Уница	22,6	1,0	0,64	10	$\frac{0-150}{52}$	0,1	мезо
р. Путкозерка	38,0	2,6	0,69	30	$\frac{0-190}{80}$	0,8	евтроф.
р. Падмозерка	18,9	1,0	0,62	50	$\frac{20-240}{112}$	1,2	мезо
р. Падма	14,4	0,4	0,66	30	$\frac{80-320}{223}$	1,3	мезо
р. Царевка	31,9	4,4	0,58	20	$\frac{20-120}{70}$	1,2	евтроф.
руч. Калей	35,3	2,5	0,82	20	$\frac{0-190}{80}$	0,1	евтроф.
р. Антоновщина	69,8	14,0	0,72	10	$\frac{0-470}{230}$	0,5	высокоев- троф.
Средние	32,9	3,7	0,68	25	$\frac{0-470}{122}$	0,8	евтроф.

Примечание. В числителе – пределы колебаний, в знаменателе – средние значения.

В целом по укрупненным классам гумусности, щелочности и трофности выделено восемь геохимических классов вод на Заонежском полуострове (рис. 4.8):

- низкогумусные средне-, высокощелочностные циркумнейтральные – слабощелочные низкотрофные (7 объектов);

- низкогумусные средне-, высокощелочностные циркумнейтральные – слабощелочные среднетрофные (12 объектов);

- низкогумусные средне-, высокощелочностные циркумнейтральные – слабощелочные высокотрофные (5 объектов);

- среднегумусные средне-, высокощелочностные циркумнейтральные – слабощелочные среднетрофные (6 объектов);

- высокогумусные средне-, высокощелочностные циркумнейтральные – слабощелочные среднетрофные (7 объектов);

- высокогумусные средне-, высокощелочностные циркумнейтральные – слабощелочные среднетрофные (9 объектов);

- высокогумусные низкощелочностные сла-

бокислoneйтральные среднетрофные (7 объектов);

- высокогумусные низкощелочностные слабокислoneйтральные высокотрофные (5 объектов).

В целом количество выделенных геохимических классов вод составляет третью часть от установленных на территории Карелии. Одной из причин является отсутствие среди поверхностных вод полуострова слабощелочностных слабокислых (pH 5,0–6,2) и бесщелочностных кислых (pH < 5,0), что обусловлено наличием карбонатных пород на его водосборе. В этой связи водные объекты Заонежья весьма устойчивы к закислению.

Среди озерных вод преобладают низкогумусные средне-, высокощелочностные средне- и низкотрофные (33%), а среди речных – высокогумусные средне-, высокощелочностные средне- и высокотрофные (40%), что в общей сложности составляет 73% от числа обследованных. Большая гумусность и уровень трофии речных вод по сравнению с озерными является

типичной картиной, что обусловлено влиянием внутриводоемных процессов на качественные характеристики озерных вод.

По совокупности трех параметров (содержанию ОВ, $P_{\text{общ}}$ и щелочности воды) с учетом кислородного режима качество поверхностных вод Заонежья может быть отнесено (рис. 4.9): к высокому – 19 объектов (32%), хорошему – 24 объекта (41%), удовлетворительному – 13 объектов (22%), низкому – 3 объекта (5%). Следует отметить, что по первым трем показателям к высокому классу качества тяготеет большее число объектов, но многие из них являются кислороддефицитными в период зимней и летней стагнаций, и по этой причине качество воды их ниже. К водам с низким качеством отнесены полигумусные высокоэвтрофные объекты (р. Антоновщина, водосбор 9 и оз. Керещкое), в которых и содержание кислорода достаточно низкое.

В отличие от регионального распределения в Заонежье отмечается повышенная доля вод с высоким и хорошим качеством и пониженная – удовлетворительного, но эта разница не столь контрастна, и она имеет место и в других районах Карелии.

Таким образом, установлены основные геохимические черты поверхностных вод Заонежья, которые в целом близки к региональным. Одной из особенностей вод являются повышенные минерализация, щелочность и трофность. Большинство объектов характеризуется высокой природной кондицией вод, что подтверждено и более ранними исследованиями 1961–1962 гг.; 1992 г. (Маслова, 1965; Харкевич, 1965; Морозов, 1998).

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ, РАДИОАКТИВНОСТЬ И НЕФТЕПРОДУКТЫ

В водных объектах Заонежского полуострова были исследованы фториды, нефтепродукты, микроэлементы, в том числе тяжелые металлы, радионуклиды.

Содержание фторидов находится на уровне регионального фона (0,03–0,06 мг/л), оно несколько выше в реках Царевке и Калей (0,19 и 0,25 мг/л соответственно).

Концентрация нефтепродуктов во всех пробах была ниже предела их обнаружения (<0,02 мг/л). Отсутствие нефтяного загрязнения для данного района является закономерным в связи с низкой техногенной нагрузкой.

Содержание микроэлементов в поверхностных водах Заонежья имеет определенную специфику по сравнению с другими районами Карелии, связанную с геохимическими аномалиями, характерными для рудоносных провинций.

По данным анализа проб воды, выполненных в 2000 г. в Хельсинки (табл. 4.8), было установлено, что во всех без исключениях объектах содержание серебра и кадмия было ($Ag < 0,06$, $Cd < 0,03$ мкг/л) ниже предела обнаружения. Минимально определяемое количество Cr составляло 0,11–0,17, Pb 0,04–0,13, V 0,08–0,17, U <0,01–0,06 мкг/л, и только в реках Падмозерке, Падме, Путкозерке и в озерах Яндомозеро, Падмозеро их количество было выше: Cr – 0,21–0,61, Pb – 0,06–0,40, V – 0,25–0,86, U – 0,06–0,17 мкг/л, но оно не превосходило величин ПДК. Проявление уран-ванадиевого месторождения выражается в незначительном повышении концентраций прежде всего V и U в водных объектах, примыкающих к месторождению (рис. 4.10). Суммарная α -активность достаточно низкая – <0,02 Бк/л при допустимой для питьевых целей 0,1 Бк/л.

В 2001 г. по ряду объектов были выполнены анализы металлов методом ICP MS в С.-Петербурге в лаборатории, аккредитованной Госстандартом России. Результаты этих анализов представлены в табл. 4.9. Эти пробы были отобраны в зимний период.

Весной 2001 г. также были отобраны пробы из поверхностных горизонтов на анализ тяжелых металлов, который был выполнен в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС методом атомной абсорбции в ацетиленовом пламени после 10-кратного концентрирования проб путем их выпаривания (табл. 4.10).

Сравнение данных анализов, выполненных разными лабораториями, показывает, что при анализе металлов методом ICP MS в некоторых объектах наблюдаются существенные отклонения. Так, в оз. Турастомозеро отмечены самые высокие показатели содержания тяжелых металлов в 2001 г. по сравнению с 2000.

Таблица 4.8. Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах Заонежья (август 2000 г.), мкг/л

Объект	U + Ra + Po, Бк/л	V	Cr	Ag	Cd	Pb	U
р. Падмозерка	<0,02	0,33	0,21	<0,06	<0,03	0,12	0,17
р. Падма	<0,02	0,25	0,38	<0,06	<0,03	0,06	0,08
оз. Ванчозеро	<0,02	0,08	0,11	<0,06	<0,03	0,04	0,01
оз. Н. Мягрозеро	<0,02	0,11	0,16	<0,06	<0,03	0,05	0,02
оз. Ладмозеро	<0,02	0,06	0,11	<0,06	<0,03	0,04	<0,01
оз. Валгомозеро	<0,02	0,09	0,17	<0,06	<0,03	0,12	0,06
оз. Путкозеро	<0,02	0,07	0,13	<0,06	<0,03	0,07	0,03
оз. Космозеро	<0,02	0,17	0,15	<0,06	<0,03	0,13	<0,01
оз. Яндомозеро	<0,02	0,41	0,26	<0,06	<0,03	0,28	0,01
оз. Падмозеро	<0,02	0,46	0,25	<0,06	<0,03	0,16	0,16
р. Путкозерка	<0,02	0,86	0,61	<0,06	<0,03	0,40	0,06
оз. Турастомозеро	<0,02	0,13	0,22	<0,06	<0,03	0,08	<0,01
Кефть-губа	<0,02	0,14	0,16	<0,06	<0,03	0,12	0,02

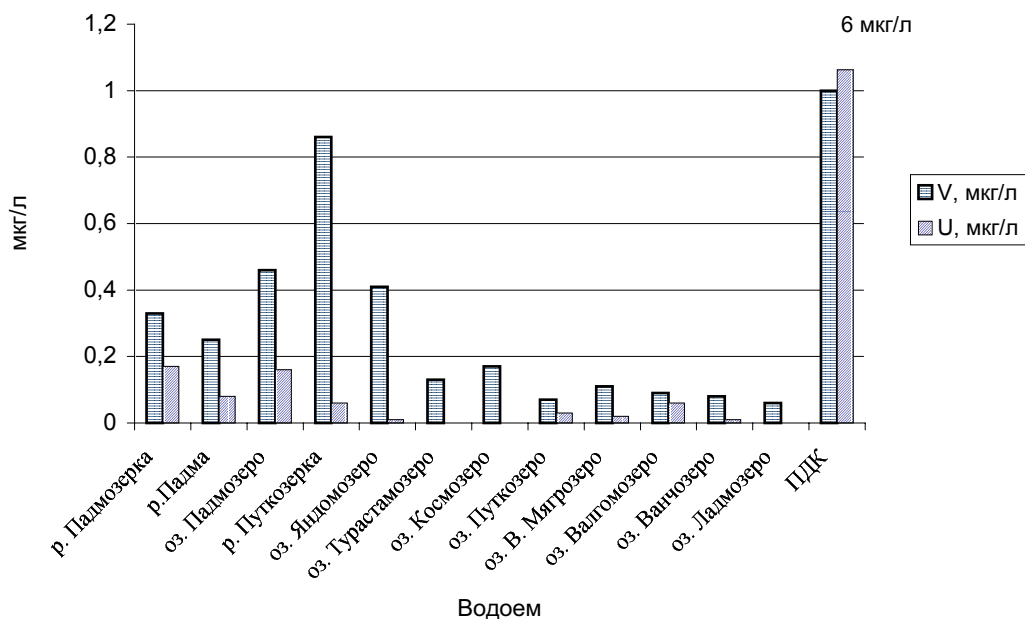


Рис. 4.10. Уран и ванадий в водных объектах Заонежья

Таблица 4.9. Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах Заонежья (зима 2001 г.), мкг/л

Объект	V	Cr	Ag	Cd	Pb	U
р. Падмозерка	0,45	0,10	<0,01	0,05	0,10	0,26
р. Падма	0,48	0,41	<0,01	<0,02	0,01	0,015
оз. Ванчозеро	0,16	2,5	<0,01	<0,02	<0,01	0,02
оз. Н. Мягрозеро	0,23	<0,1	<0,01	<0,02	0,15	0,01
оз. Ладмозеро	0,62	0,48	7,42	<0,02	1,57	0,03
оз. Валгомозеро	0,08	0,31	<0,01	0,03	0,27	0,11
оз. Путкозеро	0,14	0,50	0,01	<0,02	<0,01	0,01
оз. Космозеро	0,28	0,49	0,02	0,04	0,32	0,08
оз. Яндомозеро	0,078	0,52	<0,01	0,34	0,97	0,09
оз. Падмозеро	0,61	0,24	0,01	0,02	0,26	0,27
р. Путкозерка	0,43	0,030	<0,01	<0,02	0,27	0,09
оз. Турастомозеро	1,05	1,44	0,16	0,15	2,03	0,05
Кефть-губа	0,21	0,12	<0,01	0,04	0,54	0,04
ПДК	1	1	1	5	6	6

(CrVI)

Таблица 4.10. Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах Заонежья (июнь 2001 г.), мкг/л

Объект	Zn	Cu	Cd	Ni
оз. Падмозеро	–	1,7	<0,5	<1
оз. Путкозеро	<1	<1	<0,5	<1
р. Падмозерка	1,9	1,5	<0,5	2,5
р. Антоновщина	3,8	1,5	<0,5	1,2
оз. Яндомозеро	–	2,0	<0,5	–
оз. Космозеро	–	–	<0,5	–
р. Путкозерка	–	<1	<0,5	–
р. Падма	–	–	<0,5	–
р. Царевка	–	1,0	<0,5	–
оз. Ладмозеро	1,4	<1	<0,5	1,7
оз. Турастомозеро	10,3	2,3	<0,5	6,0
оз. Мягрозеро	2,8	<1	<0,5	<1
оз. Ванчозеро	4,5	<1	<0,5	2,4
оз. Валгомозеро	–	2,0	–	–

Возможно, одной из причин является влияние шунгитовых пород, которые, как известно, при выщелачивании дают повышенные концентрации металлов. Если исключить из рассмотрения контрастные результаты, полученные методом ICP MS в 2001 г., то повышенные кон-

центрации U наблюдаются в реках Падмозерке, Падме, Путкозерке и в озерах Падмозеро и Яндомозеро (рис. 4.11). В этих же объектах отмечено превышение фоновых значений и для других микроэлементов (рис. 4.12). Такая же картина в распределении U и V была выявлена и в 2000 г.

Исходя из вышесказанного, следует отметить, что в водных объектах Заонежья, примыкающих к водосбору месторождения Средняя Падма или находящихся в его пределах, наблюдается превышение фоновых концентраций многих металлов, в том числе ванадия и урана, но оно не столь контрастно и зачастую не превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Бесспорно, данный вопрос очень важен в связи с возможной перспективой разработки месторождения, и он требует специального исследования.

Заключение

Гидрохимические исследования водных объектов Онежского рудного района, главным образом в пределах Заонежского полуострова, были проведены в 1999–2001 гг. Наблюдениями были охвачены 34 водосбора, включающих 59 объектов. При этом основное внимание уделялось водным объектам, водосборы которых находятся в районе уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма или примыкают к нему.

Одной из особенностей Заонежского полуострова является высокая гидрографическая расчлененность территории (более 30 водосборов). При этом водотоки имеют малую длину, а озера – небольшой удельный водосбор.

По химическому макрокомпонентному составу поверхностные воды Заонежья выделяются среди вод региона прежде всего повышенными

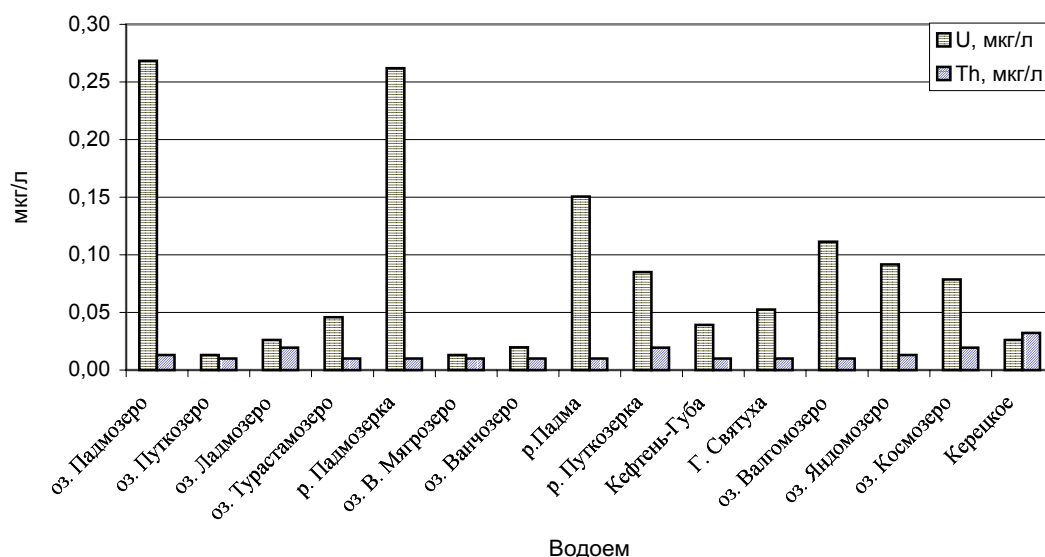


Рис. 4.11. Уран и торий в водных объектах Заонежья (2001 г.)

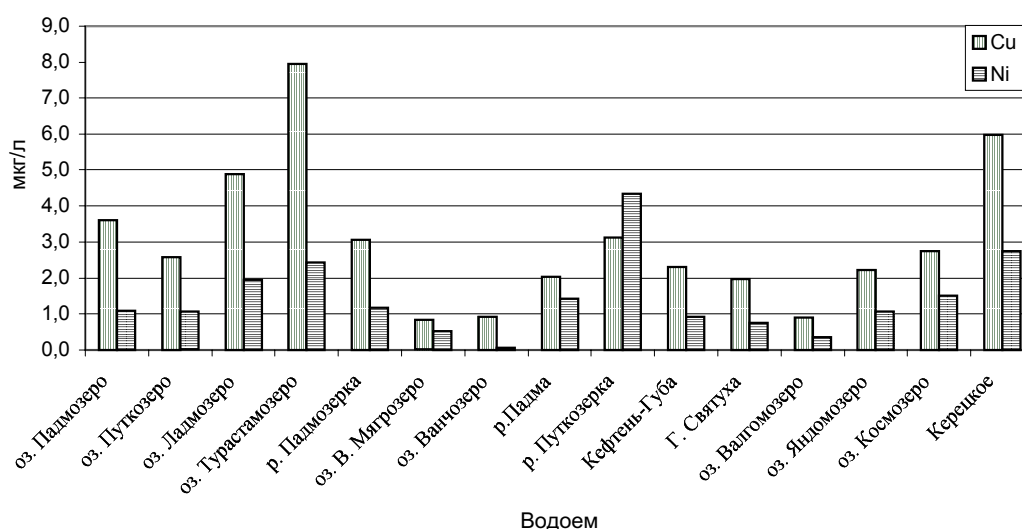


Рис. 4.12. Медь и никель в водных объектах Заонежья (2001 г.)

минерализацией, щелочностью и трофностью при низком содержании органического вещества в озерах и высоком – в реках. Большинство озер и некоторые реки имеют высокое качество воды, пригодное для многих видов водопользования без существенной водоподготовки. К наиболее высококондиционным относятся воды озер Космозеро, Путкозеро, Ладмозеро, Турастомозеро, Верхнее Мягрозеро, Вангозеро, Валгомозеро, Леликозеро и др. с показателями: $\Sigma_{\text{и}}$ – 20–100 мг/л, цветность – 5–14 град., содержание железа – 20–50, марганца – 10–70 и фосфора общего – 5–18 мкг/л. Удовлетворительное и хорошее качество воды имеют большинство обследованных водотоков: Кумса, Уница, Макушиха-Тунат, Путкозерка, Судма, Маткозерка, Карасозерка, Тамбица (сумма ионов – 43–340 мг/л, цветность – 30–80 град., Fe – 90–970, Mn – 30–480, P_{общ} – 10–34 мкг/л).

Исследование микрокомпонентного состава в водных объектах Заонежского полуострова

показало, что в большинстве из них содержание металлов-микроэлементов находится на уровне регионального фона, и только в водных объектах, примыкающих к уран-ванадиевому месторождению Средняя Падма, выявлено несколько большее содержание U, V и ряда других металлов (Cr, Pb, Ni и пр.), чем фоновое, но их концентрация ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Суммарная α -активность достаточно низкая (<0,02 Бк/л) при допустимой для питьевых целей 0,1 Бк/л.

Таким образом, на основании гидрохимических исследований в пределах Онежского рудного района можно констатировать, что в естественных условиях рудопроявление не сказывается на содержании многих элементов, а на качественных и количественных характеристиках природных вод Заонежья в большей степени отражаются особенности геолого-геоморфологического строения его территории.

Литература

- Маслова Н. П., 1965. Гидрохимия озер Западного Заонежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 140–154.
- Морозов А. К., 1998. Кончезерская, Нижнесунская, Заонежская группы озер. Кедрозеро и Тарасмозеро: Химический состав воды // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 160–162.
- Фрейндлинг В. А., Поляков Ю. К., 1965. Морфология и гидрология озер Заонежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 61–78.
- Харкевич Н. С., 1965. Гидрохимия озер Восточного Заонежья // Там же. С. 110–139.
- Lozovik P., Filatov N., Morozov A. et al., 2001. Water quality classification of water bodies in Russian Karelia // International Symposium “Classification of Ecological Status of Lakes and Rivers”. November 9-10, 2001. Helsinki, Finland. Tema Nord: 584. P. 65–67.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ЗАОНЕЖЬЯ

Г. С. БОРОДУЛИНА¹, С. И. МАЗУХИНА²

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

² Институт проблем промышленной экологии Севера
Кольского научного центра РАН (Апатиты)

В главе отражены результаты гидрогеохимических исследований на Заонежском полуострове. Освещены общие гидрогеологические и гидрогеохимические условия территории. Рассмотрены особенности формирования подземных вод на месторождениях шунгитов и уран-ванадиевых руд (Средняя Падма). Методом физико-химического моделирования многокомпонентной водной системы установлены ионные формы миграции основных рудных компонентов в природных водах месторождения Средняя Падма. Дана оценка процессов взаимодействия подземных и поверхностных вод (сброс шахтных вод в р. Падму) при эксплуатации месторождения, а также процессов выщелачивания пород на поверхности.

G. S. BORODULINA, S. I. MAZUKHINA. GROUNDWATER OF ZAONEZHYE

Results of hydrogeochemical investigations on the Zaonezhye peninsula are presented. The hydrogeological and hydrogeochemical conditions of the territory are revealed. Particularities of the forming of groundwater on shungite and uranus-vanadium ore (Srednyaya Padma) are considered. The ionic forms of main ore components in natural water of the Srednyaya Padma deposit were installed with use of physic-chemical modeling method. It is given estimation of the processes of the interaction groundwater and river water (the inflow of mine water to the Padma River) at ore development, as well as processes of leaching rocks at surface conditions.

Ключевые слова: подземные воды, химический состав, физико-химическое моделирование, выщелачивание.

Гидрогеологические условия района

Заонежский полуостров входит в состав Балтийского бассейна трещинных вод, где основной водоносный горизонт приурочен к верхней трещиноватой зоне кристаллического массива. Практически на всей территории развиты также поровые грунтовые воды рыхлых отложений четвертичного возраста, имеющие непосредственную гидравлическую связь с трещинными водами.

Трещинные воды приурочены к зоне региональной трещиноватости, мощность которой обычно составляет 30–50 м. Ниже этой зоны породы практически безводные. Только в зонах тектонических нарушений глубина распространения обводненных трещин увеличивается до 100–200 м. Водообильность и водопроницаемость пород неравномерна и находится в пря-

мой зависимости от степени их трещиноватости и закарстованности. Наибольшей проницаемостью отличаются карбонатные породы. В целом для полуострова характерен невысокий модуль подземного стока – 1–2 л/с · км² (Ресурсы..., 1987).

Уровни подземных вод залегают на небольшой глубине – в пределах первых метров, и в целом зеркало подземных вод в сглаженном виде отражает рельеф территории. Подземные воды, как правило, безнапорные. Лишь на отдельных локальных участках воды приобретают напор, и пробуренные скважины самоизливают.

Питание подземных вод осуществляется полностью за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгрузка происходит в реки, озера, болота.

Общие гидрогеологические условия открытого кристаллического массива, характеризую-

щегося отсутствием региональных водоупоров, определяют довольно простую схему движения подземных вод. Водосборы поверхностных и подземных вод совпадают; движение подземных вод направлено от водоразделов к ближайшим поверхностным водотокам и водоемам.

Геохимия подземных вод

Подземные воды Заонежья характеризуются наибольшим разнообразием по минерализации и химическому составу. Это обусловлено тем, что породы Онежской мульды по составу и строению резко отличаются от других карельских отложений. В разрезе структуры парагенетически сочетаются пачки разнообразных первично-глинистых (серицит-хлорит-карбонат-кварцевых) и карбонатных пород, а также чрезвычайно характерных для этого комплекса углеродсодержащих пород. Здесь же развиты разнообразные вулканические и вулканогенно-осадочные породы.

Минерализация подземных вод варьирует в широких пределах: от 0,1 до 1 г/л (иногда достигает 4 г/л). В табл. 5.1 приведены примеры химического состава подземных вод, вскрываемых родниками, колодцами, самоизливающимися скважинами.

Самые маломинерализованные (до 0,15 г/л) слабокислые воды (рН 5,5–6,5) встречаются в флювиогляциальных отложениях и супесчано-песчаных разностях морены, располагающихся выше эрозионного вреза местной гидрографической сети (верхняя гидрогеохимическая

подзона). Главная роль в формировании химического состава этих вод принадлежит климатическому фактору. Это обусловлено кратковременным пребыванием воды в системе порода – вода, так как расстояние от области питания до области разгрузки невелико вследствие разветвленной озерно-речной сети. По преобладающим компонентам состав воды, как правило, гидрокарбонатный (гидрокарбонатно-сульфатный) кальциево-магний.

В нижней гидрогеохимической подзоне возрастает время взаимодействия в системе порода – вода. Это определяется как увеличением длины пути фильтрации, так и уменьшением фильтрационных параметров с глубиной. Воды с минерализацией до 0,45 г/л относятся к гидрокарбонатным, смешанным по катионам, как правило, Са и Mg преобладают. С увеличением минерализации более 0,45 г/л состав вод меняется на гидрокарбонатно-хлоридный натриево-кальциевый. Солоноватые воды (минерализация >1 г/л) имеют хлоридный или хлоридно-гидрокарбонатный натриевый состав. Хлоридно-натриевые воды вскрываются скважиной и «Соляной ямой» в районе пос. Великая Губа (в нижнем течении рек Судмы и Антоновщины), хлоридно-гидрокарбонатные натриевые – в окрестностях Кузаранды, а также на месторождениях Зажогинское и Средняя Падма.

Особый интерес представляет родник «Соляная яма» – единственный известный в Карелии естественный очаг разгрузки солоноватых подземных вод. С 1984 г. родник имеет статус

Таблица 5.1. Химический состав подземных вод Заонежья

Местоположение	Водопункт	рН	Na	K	Ca	Mg	Fe	HCO ₃	Cl	SO ₄	Минерализация, г/л
мг/л											
Карасозеро, 15 км С пос.	Родник «Три Ивана»	6,3–7,0	1,1–8,3	0,2–8,0	10–12	2–5	0,1	34–57	1,0–1,5	7–16	0,06–0,10
Ламбасручей 6 км Ю д. Толвуя	Родник «Царьцын ключ»	7,0–7,3	5,5–6,0	6,0–6,4	37–52	24–36	0,2	220–300	3,0–3,5	30–42	0,37–0,44
Терехово	Родник	5,7	3,8	3,3	11	8,4	0,1	25	4,6	43	0,10
Турастомозеро	Родник	7,0	2,2	0,3	30	6	<0,1	110	1	20	0,17
Пуданцев Бор	Родник	7,0	6,7	5	102	35	1,4	438	6,7	66	0,66
Побережье	Родник	7,3	4	2	64	31	<0,1	320	1	20	0,45
Вороний остров	Родник	7,4	12	3,3	42	26	<0,1	315	4	13	0,42
Толвуя	Колодец	6,5	9	10	120	65	0,3	480	14	180	0,93
Шуньга	Колодец	6,8	21	6	144	6,5	0,6	450	7,5	70	0,71
Никитинская 1,7 км от устья р. Судмы	Колодец «Соляная яма»	6,9	13	13	85	33	1,0	290	40	76	0,55
	1961 г.	7,2	1146	–	162	145	–	230	2247	131	4,1
	1994 г.	6,2	608	7,5	82	55	0,9	40	1000	125	1,9
Великая Губа	Скважина	8,0	640	8,5	60	30	<0,1	110	895	115	1,9
Палтега	Скважина	8,2	94	3,4	9	13	<0,1	250	44	27	0,45
Ламбасручей	Скважина	8,0	15	0,6	18	15	<0,1	150	1	20	0,22
Кузаранда	Скважина	7,3	21	2,8	50	26	0,5	192	27	74	0,40
	Скважина	7,6	110	3	10	15	0,2	180	89	48	0,47
Лисицыно	Скважина	7,1	8,4	5,5	53	32	0,2	226	10	105	0,50
Зажогинское м-ние	12 скважин	6,2–7,2	5–23	3–11	30–172	17–77	0,2–8,0	100–425	4–21	40–280	0,3–1,1
М-ние	22 скважины										
Ср. Падма		7,0–9,8	10–300	1–7	5–64	4–34	0,2–10,0	150–400	2–336	2–40	0,3–1,1

памятника природы. В 1960–1970-х годах родник еще сохранял следы каптажа, минерализация воды составляла 4 г/л. К моменту последнего опробования в 1994 г. родник практически заплыл торфом, поэтому проба воды – результат смешения подземных и поверхностных вод (табл. 5.1). Тем не менее вода источника сохраняет свои геохимические особенности – повышенную минерализацию (1,9 г/л) и хлоридно-натриевый состав. Разгрузка напорных минерализованных вод, по-видимому, связана с одной из надразломных зон складчато-разрывных дислокаций (Святухинско-Космозерской). Влияние подземного стока проявляется в изменении гидрокарбонатно-кальциевого состава воды р. Антоновщины на хлоридно-натриевый в меженный период.

Участки с широким развитием шунгитсодержащих пород характеризуются преобладающим развитием подземных вод сульфатного типа. Так, в пределах Зажогинского месторождения шунгитов распространены подземные воды с максимальными для Онежской структуры концентрациями сульфатов, кальция, магния, при этом относительные содержания натрия и хлора не превышают 10%. Воды формируются в достаточно узком диапазоне значений pH 6,6–7,2, состав по преобладающим компонентам гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-магниевый. Основным фактором, определяющим формирование такого типа подземных вод, является повышенное содержание в шунгитах сульфидов, среди которых преобладают пирит и пирротин (Голубев и др., 1984).

Химический состав подземных вод на месторождении Средняя Падма характеризуется

большой изменчивостью (табл. 5.1), наибольшей вариабельностью отличается поведение Na и Cl, поэтому здесь формируются подземные воды двух типов: гидрокарбонатные кальциево-магниевые и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые. Последние характеризуются повышенной минерализацией, высокими значениями pH (до 9,8) и приурочены к ореолам околорудных изменений алевролитов и сланцев заонежской свиты. На границе с доломитами туломозерской свиты в результате понижения pH проявляется кислый барьер, на котором могут концентрироваться аниогенные элементы.

Впервые в подземных водах района определен весь спектр микрокомпонентов. Абсолютные их концентрации, как и для всего региона, в целом сравнительно низкие. Для отдельных компонентов они изменяются в широких пределах, от долей и единиц до десятков и сотен мкг/л.

Основной объем анализов водных проб на микрокомпоненты в Заонежье выполнен на месторождениях Зажогинское и Средняя Падма. В табл. 5.2 представлены результаты определений в сравнении с региональными фоновыми концентрациями.

Геохимическими концентраторами элементов являются рудные месторождения, но и другие типы пород могут характеризоваться благоприятными условиями накопления. Известно, что среди углеродсодержащих пород Карелии, общим для которых является повышенное содержание сульфидов, шунгиты заметно обогащены рудогенными элементами (Ni, Cu, Co, Cr, V, Zn) (Голубев и др., 1984). Уровень содержания и ассоциации микроэлементов в водах

Таблица 5.2. Микрокомпоненты в подземных водах, мкг/л

Элемент	Зажогинское	Ср. Падма	Регион. фон	Элемент	Зажогинское	Ср. Падма	Регион. фон
Ag	<0,01–0,66	<0,01–0,02	<0,01	Nd	0,03–0,19	0,01–0,15	0,1
Al	1–770	5,6–510	35	Ni	0,7–360	<0,5–9	2
As	<0,1–48	<0,1–1,1	0,5	Pb	<0,01–13	<0,01–3	0,7
B	2–19	9–336	10	Pr	0,03–0,19	0,01–0,15	0,1
Ba	17–190	23–2065	57	Rb	0,2–11,6	1,4–12,3	1,7
Be	<0,02–0,18	<0,02–0,11	<0,02	Ru	<0,02–0,07	<0,02–0,04	<0,02
Bi	<0,01–6,7	<0,01–0,04	<0,01	Rh	<0,01–0,03	<0,01–0,04	<0,01
Br	<5–22	0,7–364	5	Re	<0,02–0,91	<0,02–1,18	<0,02
Cd	<0,02–21	<0,02–0,49	0,06	Sb	0,03–0,76	<0,02–0,66	0,09
Ce	0,19–1,4	0,08–1,0	0,37	Sc	<1–4,5	<1–3,9	2,5
Co	0,04–34	0,06–2,2	0,18	Se	<0,5–10	<0,5–2,5	<0,5
Cr	0,4–10	0,3–4,7	0,9	Si, мг/л	1–30	0,6–7,6	4,2
Cs	<0,01–0,06	<0,01–0,06	0,01	Sm	<0,02–0,06	<0,02–0,09	0,04
Cu	0,5–30	0,5–84	2,5	Sn	<0,02–0,59	<0,02–1,8	0,02
Dy	<0,02–0,04	<0,02–0,04	0,03	Sr	25–360	68–589	81
Er	<0,02–0,05	<0,02–0,03	<0,02	Ta	<0,01–0,22	<0,01	<0,01
Eu	<0,02–0,04	<0,02–0,26	0,03	Te	<0,05–0,09	<0,05–0,13	<0,05
Ga	<0,01–0,16	<0,01–0,08	0,03	Th	<0,01–0,05	<0,01–0,05	0,01
Gd	<0,02–0,08	<0,02–0,08	0,03	Ti	0,5–20	1,1–5,2	1,6
Ge	<0,02–0,17	<0,02–1,22	0,03	Tl	<0,01–0,16	<0,01	<0,01
Hg	<0,05–0,19	<0,05–0,25	<0,05	U	0,08–21	0,07–187	0,09
I	0,5–4,7	2,7–432	4,5	V	0,14–2,6	0,08–15,3	0,4
La	0,01–7,3	0,14–17,3	0,9	W	<0,02–0,2	<0,02–15,5	0,03
Li	0,2–7	3–47,7	1,9	Y	0,03–0,94	0,02–0,46	0,17
Mn	0,5–1100	15,6–523	25	Zn	7–840	7–220	36
Mo	0,17–48	0,12–36	0,38	Zr	<0,02–12,4	0,08–0,9	0,05
Nb	<0,01–0,28	<0,01–0,06	<0,01	Tb, Tm, Lu, Ir, Ho, Yb, Au, Pt, Hf, Os < 0,02			

конкретных месторождений зависят от многих факторов (минералогического состава, типа месторождения, геолого-тектонических характеристик, химического состава подземных вод, геохимических условий и т. д.).

Максимальные в регионе (общее количество 700 анализов) концентрации многих элементов в подземных водах зафиксированы на месторождениях Заонежья (мкг/л): на Зажогинском – Be 0,18, Al 770, Cr 10, Ni 360, Co 34, Se 10, Zr 12,4, Mo 48, Ag 0,66, Cd 21, Bi 6,7, Ta 0,22; на Средней Падме – Li 47,7, B 336, V 15,3, Cu 84, Ge 1,22, Br 364, Ba 2065.

С получением новых данных по региону расстановка может измениться, но следует отметить, что, по результатам нашего опробования, на сегодняшний день максимальная концентрация урана (300 мкг/л) зафиксирована в районе пос. Песчаное, а, например, такое же количество урана (188 мкг/л), что и максимальное на Средней Падме, содержится в подземной воде пос. Муезерский. Но надо подчеркнуть, что на месторождении нами опробована лишь верхняя часть водоносного горизонта (до 40 м), а по данным разведочных работ (Петров, 1991ф) концентрация урана в водопроявлениях в подземных выработках достигала 3,8 мг/л.

В табл. 5.3 приведены данные о содержании U, Mo, V, Cu в водах мира и отдельных стран. Для подземных вод Финляндии известно, что в районах развития мигматитов, гранитов концентрации урана достигают высоких значений, например, в районе Хельсинки 14 проб из 308 скважин содержат 1–14 мг/л урана (Asikainen, 1981).

Анализ данных микрокомпонентного состава подземных вод двух месторождений Заонежья (шунгитов и уран-ванадиевого) позволил разделить элементы на четыре группы:

1. Элементы с близкими к региональному фону значениями, практически не образующие гидрогеохимические аномалии в пределах обоих месторождений: Be, Al, Ti, Cr, Cu, Ga, Se, Sr, Rb, Zr, Ag, Sn, Sb, Cs, ΣPЗЭ, Tl, Pb, Bi, Th. Аномальные концентрации некоторых из них отмечаются в единичных пробах на месторождении шунгитов.

2. Элементы, средние концентрации которых значительно выше фона, образующие контрастные аномалии в подземных водах обоих месторождений: Mn, Fe, Mo, U. Контрастность аномалий урана выше в водах месторождения Средняя Падма.

3. Элементы с близкими к региональному фону значениями в водах шунгитов, образующие контрастные аномалии в щелочных подземных водах уран-ванадиевого месторождения: Li, B, Ge, Ba, I, V, W.

4. Элементы с близкими к региональному фону значениями в водах уран-ванадиевого месторождения, создающие контрастные аномалии в водах шунгитов: Ni, Co, As, Cd, Zn.

Гидрогеохимические условия формирования подземных вод и ассоциация приоритетных элементов аномалии на месторождении шунгитов во многом сходны с условиями и характеристикой аномалий в подземных водах сульфидных месторождений Печенгской структуры, хотя значительно уступают им по интенсивности. Увеличение объемов добычи шунгитов с увеличением объемов вскрышных пород и откачиваемых карьерных вод может создать техногенную аномалию в поверхностных водах, меньшей интенсивности, чем в условиях сульфидных месторождений, но аналогичную ей по основным элементам-загрязнителям.

Возможность освоения месторождения Средняя Падма вызывает дискуссию в научных и общественных кругах, поскольку вторым по значимости металлом руды является уран, и остро встают вопросы обеспечения радиационной безопасности, хотя опасность разработки месторождения связана не только с ураном, но и с загрязнением среды элементами-примесями, в число которых входят медь, молибден и другие металлы, достигающие высоких концентраций в рудах этого типа (Металлогения Карелии, 1999).

Для характеристики геохимической нагрузки можно воспользоваться показателем Z_c (Геохимия..., 1990), который представляет собой сумму коэффициентов концентрации (за вычетом фона) химических элементов, входящих в геохимическую ассоциацию, т. е. отражает

Таблица 5.3. Концентрации Cu, U, Mo, V в природных водах, мг/л

		Океан		Реки		Озера		Подземные воды	
		Мир		Финляндия		Норвегия		Норвегия	
Cu	Median	0,00025	0,003	0,00064	0,0005	0,000413	0,01175	0,0025	
	Min			0,00013	<0,0001	<0,0002	0,0004	<0,0005	
	Max			0,00371	0,0023	0,0377	1,332	0,100	
V	Median	0,0025	0,0009	0,00053	<0,005	<0,0003	0,0005	0,00043	
	Min			0,00008	<0,005	<0,0003	<0,00001	<0,0001	
	Max			0,0021	0,006	0,00243	0,0163	0,01527	
Mo	Median	0,01	0,0005	0,00015	<0,00005	<0,00004	0,00163	0,00038	
	Min			<0,00003	<0,00005	<0,00004	<0,00005	<0,00002	
	Max			0,00122	0,01295	0,00695	0,28938	0,048	
U	Median	0,0032	0,00004	0,000073	0,000036	0,000041	0,0035	0,0001	
	Min			<0,00001	<0,000005	<0,000004	0,000008	<0,00001	
	Max			0,00145	0,001026	0,00222	2,01786	0,304	

Примечание. Данные (за исключением Карелии) Environmental Geochemical Atlas of the central Barents Region. NGU. 1998.

аддитивное превышение фонового уровня группой ассоциирующих элементов. Для подземных вод месторождения показатель Z_c колеблется в широких пределах 20–2300, и картина его распределения соответствует распределению величины pH. Рис. 5.1 показывает, что наибольшая экологическая опасность связана с областью развития щелочных вод. Это воды хлоридного или гидрокарбонатно-хлоридного натриевого состава, для них наиболее вероятны повышенные концентрации радия. С водами такого состава связано и ураганное содержание радона ($1,1 \cdot 10^5$ Бк/л) в одной из скважин, в то время как в остальных скважинах на месторождении концентрации радона невысокие – в основном менее 100 Бк/л и не превышают 700 Бк/л.

При рассмотрении вариантов добычи на месторождении Средняя Падма предпочтение отдается варианту с подземной добычей руды и ее последующей переработкой за пределами Карелии. Но даже такой вариант добычи неизбежно отразится на состоянии окружающей среды и, в первую очередь, водных объектов.

Моделирование процессов смешивания природных вод и выщелачивания пород

Процессы массопереноса, составляющие основу формирования химического состава подземных вод рудных месторождений, невозможно правильно интерпретировать и прогнозировать без знания форм элементов. Природные состояния многих химических элементов в подземных водах не соответствуют форме выражения химического анализа этих вод (в нашем случае дается массовая концентрация микроэлементов). Миграция большинства из них осуществляется преимущественно в виде сложных ассоциатов – комплексных соединений. Значимость таких соединений среди форм переноса элементов изменяется в зависимости от химического состава подземных вод, их минерализации, а также кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий.

Поэтому построение адекватных моделей природных вод является необходимым и весьма важным этапом моделирования процессов взаимодействия подземных и поверхностных вод при сбросе шахтных вод в период эксплуатации месторождения. Для оценки этих процессов применен метод физико-химического моделирования многокомпонентной водной системы на основе программного комплекса «Селектор-С» (Бородулина, Мазухина, 2002).

В таблицах 5.4, 5.5 представлены примеры результатов анализа и моделирования состава подземной воды одной из скважин и воды р. Падмы. Данные опробования 2000 г., по которым проведено моделирование, показывают лишь валовые содержания элементов, отсутствуют данные о концентрациях растворенных газов. Более полные результаты анализа речной воды в 2001 г. показали близкие к модельным концентрации HCO_3^- и компонентов газового состава – CO_2 и O_2 (табл. 5.5). Вариации их содержаний входят в интервалы значений, обусловленные сезонными колебаниями.

Как известно, главные причины формирования окислительно-восстановительной зональности связаны с геохимическими особенностями водовмещающих пород и подземных вод, а также с гидродинамическими особенностями конкретных структур (Крайнов, Шве́ц, 1992). Вертикальная зональность выражается в закономерных изменениях величины Eh с глубиной формирования подземных вод. Кислородные воды ($Eh > 200$ мВ) сменяются бескислородными и бессульфидными (Eh 100–200 мВ), реже возникают сульфидные условия ($Eh < 100$ мВ). Стволы разведочных скважин, как правило, оборудованы обсадными трубами только на глубину четвертичных отложений, и пробы воды из скважин являются результатом смешения вод различных интервалов коренных пород, т. е. существует связь с водами и нижних горизонтов. Подтверждением существования в гидрогеологическом разрезе восстанови-

Таблица 5.4. Результаты анализа и моделирования состава подземной воды, мг/л

Результаты анализа		Результаты моделирования		Результаты анализа		Результаты моделирования	
pH	9,76	pH	9,763	P	0,03057	HPO_4^{2-}	0,0941
Al	0,08811	$\text{Al}(\text{OH})_4^-$	0,1363	S	2,9742	SO_4^{2-}	8,8200
Ca	8,7705	AlO_2^-	0,1079	Si	1,5088	SiO_2^*	1,8033
		$\text{Ca}(\text{CO}_3)^*$	8,9608	Sr	0,1311	HSiO_3^-	1,6249
		Ca^{+2}	5,0726			Sr^{+2}	0,1053
		$\text{Ca}(\text{HCO}_3)^+$	0,1871			SrCO_3^*	0,0433
Cl	21,9071	CaSO_4^*	0,1186	V	0,00276	HVO_4^{2-}	0,0080
		Cl^-	21,8943	U	0,025411	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{-4}$	0,0470
Fe	2,036	$\text{Fe}(\text{OH})_4^-$	4,3986	Cu	0,00466	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{-2}$	0,0009
		$\text{Fe}(\text{OH})_3^*$	0,1013			$\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{-2}$	0,0125
K	4,7679	K^+	4,7652			MoO_4^{2-}	0,0103
Mg	3,2038	$\text{Mg}(\text{CO}_3)^*$	2,6473	Mo	0,01102	HMoO_4^-	0,0082
		Mg^{+2}	2,4055			HCO_3^-	105,1601
		$\text{Mg}(\text{HCO}_3)^+$	0,1204			CO_3^{2-}	34,4117
		MnO_4^-	0,0432			CO_2^*	0,0266
Mn	0,02089	MnO_4^{2-}	0,0020			N_2^*	15,3867
		Na^+	74,884			NO_3^-	2,2701
Na	74,9551	NaHSiO_3^*	0,2672			NO_2^-	0,0460
						O_2^*	5,9155

Таблица 5.5. Результаты анализа и моделирования состава воды р. Падмы, мг/л

Результаты анализа			Результаты моделирования	
	Июнь 2000	Октябрь 2001	По данным 2000 г.	
pH	6,96	7,21	pH	6,964
Al	0,092	0,039	Al(OH) ₄ ⁻	0,1093
			AlO ₂ ⁻	0,0865
			HAIO ₂ [*]	0,0261
			Al(OH) ₃ [*]	0,0239
Ca	7,30	11,01	Ca ⁺²	7,2471
			Ca(HCO ₃) ⁺	0,1109
			Ca(CO ₃) [*]	0,0088
			CaSO ₄ [*]	0,0075
Cl	0,5	4,3	Cl ⁻	0,4999
Fe	0,237	0,594	Fe(OH) ₃ [*]	0,3572
			Fe(OH) ₂ ⁺	0,0639
			Fe(OH) ₄ ⁻	0,0237
K	0,203	0,657	K ⁺	0,2031
Mg	2,668	3,492	Mg ⁺²	2,6522
			Mg(HCO ₃) ⁺	0,0552
Mn	0,029	0,034	Mn ⁺²	0,0289
Na	1,254	2,762	Na ⁺	1,2545
P	0,005	–	H ₂ PO ₄ ⁻	0,0096
			HPO ₄ ⁻²	0,0060
S	0,1	2,7	SO ₄ ⁻²	0,2942
Si	1,117	0,905	SiO ₂ [*]	2,3872
Sr	0,0172	0,0232	Sr ⁺²	0,0172
V	0,00021	0,00011	H ₂ VO ₄ ⁻	0,0005
U	0,00007	0,00006	UO ₂ (CO ₃) ₂ ⁻²	0,0001
Cu	0,00159	0,00565	Cu ⁺²	0,0014
Mo	0,00009	0,00008	H ₂ MoO ₄	0,0002
HCO ₃ ⁻	–	58,4	HCO ₃ ⁻	37,82
CO ₂ [*]	–	2,5	CO ₂ [*]	6,24
CO ₃ ⁻²	–	–	CO ₃ ⁻²	0,018
N ₂ [*]	–	–	N ₂ [*]	14,61
O ₂ [*]	–	9,3	O ₂ [*]	7,48

тельной зоны могут служить невысокие аналитические и расчетные величины сульфатной серы. Можно предположить, что сульфидная медно-молибденовая минерализация находится в восстановительных условиях.

По результатам моделирования основные элементы, определяющие макрокомпонентный состав воды, – K, Na, Cl, Ca, Mg, а также Sr – независимо от условий среды мигрируют в водах преимущественно в виде простых ионов. Лишь в щелочной среде около 30% кальция, 20% магния и 10% стронция образуют карбонатные комплексы.

Наибольшие различия в формах миграции в зависимости от физико-химических условий характерны для поливалентных элементов.

Как показали расчеты, уран в растворе образует ряд карбонатных и гидроксильных комплексов. Практически весь шестивалентный уран в водах в широком интервале pH находится в форме карбонатных комплексов уранила: UO₂(CO₃)₃⁻⁴, UO₂(CO₃)₂⁻², UO₂CO₃. В щелочных растворах преобладает UO₂(CO₃)₃⁻⁴. Миграция урана в виде карбонатных комплексов возможна даже при наличии небольших концентраций сероводорода, хотя, как известно, единственными геохимическими барьерами для урана являются сероводородный и глеевый восста-

новительный (Минералогия..., 1987; Перельман, 1979). Гидроксидные комплексные соединения урана UO₂(OH)₂ в расчетном растворе находятся в очень низких концентрациях 10⁻¹¹–10⁻¹⁴ моль/л и более характерны для слабокислых поверхностных вод, где могут переноситься в виде золя. Уран (V) в виде UO₂⁺ в модельном растворе возможен только при отрицательных значениях Eh. Уран (IV) в виде U(OH)⁺³ в таких условиях присутствует в ничтожных количествах: 10⁻¹⁵–10⁻¹⁶ моль/л.

Все соединения урана характеризуются резко выраженной химической токсичностью и радиобиологическим эффектом изотопов. Накопление урана по отношению к среде обитания уменьшается в цепи: водоросли > животные организмы бентоса > рыбы (Вредные..., 1988).

В поверхностных и подземных водах в условиях окислительной обстановки основная часть ванадия (V) по расчетам находится в виде H₂VO₄⁻ и HVO₄⁻², при снижении показателей Eh в воде образуется большое количество соединений, среди которых преобладают катионные формы ванадия (III) и (IV): VO⁺, VОН⁺², V(OH)₃⁺, VOOH⁺. В щелочных растворах возрастает доля ванадия в виде VO₄⁻³. Характерна особенность ванадия осаждаться на различных геохимических барьерах. Существенное значение для его осаждения имеет органическое вещество. Ванадий является высокотоксичным элементом, наиболее токсичны его пентавалентные соединения (Вредные..., 1988).

Максимальные концентрации молибдена (до 36 мкг/л) определены в щелочных подземных водах, при pH < 7,5 концентрация элемента на 1–2 порядка ниже. Как показали расчеты, молибден находится в виде прочных кислородсодержащих форм MoO₄⁻² и HMoO₄⁻, в которых элемент проявляет высшую степень окисления (VI).

По расчетам, медь при низких значениях Eh находится в растворе в форме Cu⁺¹, в окислительных условиях в щелочной среде образует карбонатные комплексы, в речной воде находится в основном в растворенной форме Cu⁺², в меньшей степени – в виде CuOH⁺. Медь является исключительно токсичным элементом для гидробионтов, максимально недействующая концентрация составляет 1–5 мкг/л (Вредные..., 1988). Уровень таких пороговых концентраций характерен для воды в р. Падме (табл. 5.5).

Для расчета термодинамической модели смешения подземных вод с поверхностными рассматривались соотношения их объемов от 1000/1 до 1000/1000 с учетом сезонно меняющегося расхода реки и постоянной величины подземного водопритока в шахту. За исходный состав для расчета принят химический состав сильнощелочной (9,76) с концентрацией урана 25 мкг/л подземной воды и речной воды в районе месторождения. Результаты моделирования

свидетельствуют о том, что по мере увеличения доли сбрасываемой подземной воды в объеме поверхностной (что соответствует межвенному периоду) происходит подщелачивание вод, увеличение концентраций Cl^- , K^+ , Na^+ , Sr^{+2} , уран-, ванадий-, молибден- и медьсодержащих комплексов, уменьшение концентрации Mn^{+2} . Изменяется химический тип воды (табл. 5.6).

Преобладание анионных форм U, Mo, V в природных водах способствует их хорошей миграции в растворенном состоянии, поскольку такие формы незначительно адсорбируются взвешенными частицами. Увеличение концентраций Mo, Cu, V, ПДК которых для водных объектов рыбохозяйственного значения очень низки – 1 мкг/л, может представлять серьезную опасность для гидробионтов.

С целью изучения процессов, происходящих с породами на поверхности, был выполнен численный эксперимент, имитирующий процесс выщелачивания пород атмосферными осадками. Процесс представлен как модель взаимодействия нескольких сопряженных систем (резервуаров), объединенных в мегасистему. Для этого использована термодинамическая модель, состоящая из трех резервуаров: двух проточных, содержащих по 1 кг породы, и третьего – накопителя. В 1-й резервуар мегасистемы поступает 1000 кг атмосферной воды, которая, последовательно проходя через резервуары, реагирует с все более возрастающим количеством породы, моделируя просачивание воды в толщу породы в условиях избытка, а затем – дефицита кислорода. Различные условия влияния атмосферы отражены в изменении ее химического состава (в молях): мегасистема

открыта в 1 и 3-м резервуарах (100 кг) и почти закрыта – во 2-м (1 кг). 3-й резервуар содержит только раствор, который в реальных условиях соответствует составу воды в канаве, оконтуривающей площадку складирования руды в период проходки разведочной шахты. Состав воды в канаве, проанализированный в 1994 г., характеризовался минерализацией 0,16 г/л, гидрокарбонатно-сульфатным кальциевым составом, высокими концентрациями некоторых микрокомпонентов (мкг/л): U – 600, V – 9, Mo – 100, Cu – 8,3, Se – 4,1, Zn – 1300. Надо отметить, что данные опробования канавы (которая после консервации шахты засыпана) являются натурным результатом процессов выщелачивания извлеченных пород на поверхность.

В модели смена событий от поступления воды в систему до попадания ее в накопитель исследована три раза, что позволило имитировать время протекания процесса и изучить эволюцию системы в условных единицах времени.

Состав породы в модели соответствует реальному химическому составу пород рудной зоны, отсутствующие данные по содержанию хлора и углерода дополнены их кларковыми концентрациями. В 3-м резервуаре модели имитируется поступление органического вещества (C) из почвенного и болотного горизонтов в количестве 1 моля на 1000 л (12 мг/л), поскольку в воде канавы определено высокое содержание органики (перманганатная окисляемость 60 мг O/л). Модель учитывала коэффициенты миграции S, C, Cl, V (Перельман, 1979), это в модели рассматривалось как разные степени взаимодействия элементов.

Таблица 5.6. Результаты моделирования смешения подземных и поверхностных (р. Падма) вод, мг/л

Параметры	Соотношение объемов воды (поверхностная + подземная)			
	1000 + 1	1000 + 10	1000 + 100	1000 + 1000
pH	7,24	7,27	7,62	9,01
AlO_2^-	0,0971	0,0976	0,0984	0,0723
$\text{Al}(\text{OH})_4^-$	0,1227	0,1233	0,1244	0,0914
Ca^{+2}	7,2446	7,2374	7,164	5,980
CaCO_3	0,01656	0,0188	0,05638	2,4346
Cl^-	0,5235	0,7349	2,65881	12,371
K^+	0,2082	0,2539	0,6691	2,7653
Mg^{+2}	2,6529	2,6623	2,7457	2,9769
MgCO_3	0,00379	0,0043	0,0134	0,7554
MgHCO_3^+	0,0554	0,0583	0,08645	0,1907
Mn^{+2}	0,0289	0,0288	0,0274	0,00014
Na^+	1,3532	2,2323	10,2317	50,6144
Sr^{+2}	0,01735	0,01871	0,03101	0,08083
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{-2}$	0,000158	0,00039	0,00264	0,001678
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{-4}$		0,000017	0,000365	0,017293
HVO_4^{-2}	0,000084	0,00009	0,000165	0,000547
MoO_4^{-2}	0,000186	0,00038	0,002206	0,011424
Cu^{+2}	0,0013	0,0013	0,00111	
CuOH^+	0,0003	0,0003	0,0006	0,00018
$\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{-2}$	0,000012	0,000015	0,00019	0,0047
SO_4^{-2}	0,3026	0,3772	1,0554	4,5028
HCO_3^-	37,9258	39,8852	57,6102	128,4328
Формула	$\text{HCO}_3\text{90}$		$\text{HCO}_3\text{90}$	$\text{HCO}_3\text{82 Cl13}$
Курлова	Ca56 Mg34		Na42 Ca34 Mg21	Na73 Ca13 Mg10

Результаты численного моделирования показали, что состав конечного модельного раствора вполне соответствует реальному химическому составу воды в канаве, абсолютные концентрации главных компонентов одного порядка, хотя аналитические содержания практически всех компонентов, в том числе и основных рудных элементов, выше, чем модельные (табл. 5.7). Это свидетельствует о многообразии процессов, происходящих в реальных условиях.

Таблица 5.7. Результаты анализа и моделирования химического состава воды канавы, мг/л

Компонент	Анализ	Расчетные формы аналитических концентраций	Модельный раствор (3-й резервуар)
pH	6,7		7,5
Na ⁺	5,0		7,70
K ⁺	0,8		1,18
Ca ⁺²	23,9		9,44
Mg ⁺²	8,6		4,21
HCO ₃ ⁻	71,4		34,79
Cl ⁻	6,0		2,40
SO ₄ ⁻²	33,9		26,18
SiO ₂	11,1		6,02
UO ₂ (CO ₃)	0,600*	0,2261	0,0622
UO ₂ (CO ₃) ₂ ⁻²		0,6894	0,5915
UO ₂ (CO ₃) ₃ ⁻⁴		0,0223	0,0557
HVO ₄ ⁻²	0,009*	0,0002	0,0022
H ₂ VO ₄ ⁻		0,0242	0,0055

Примечание. «*» – валовая концентрация урана и ванадия (метод анализа ICP/ms).

Таким образом, расчетным методом установлены все ионные формы миграции основных химических компонентов в подземных водах месторождения Средняя Падма, что необходимо для выбора наиболее эффективной технологии очистки шахтных вод. Результаты

моделирования также показали, что при откачке и сбросе подземных вод в озерно-речную систему при эксплуатации месторождения возможно подщелачивание поверхностных вод и увеличение концентраций ряда компонентов, в том числе соединений урана, ванадия, молибдена, меди. Моделирование процесса выщелачивания пород в поверхностных условиях подтверждает аналитические данные о высокой степени опасности складирования пород на поверхности.

Литература

- Бородулина Г. С., Мазухина С. И., 2002. Физико-химическое моделирование состава природных вод уран-ванадиевого месторождения // Геоэкология. № 6. С. 490–499.
- Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I–IV групп, 1988 / Справ. изд. Л.: Химия, Ленингр. отд. 512 с.
- Геохимия окружающей среды, 1990 / Сает Ю. А., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. М.: Недра. 335 с.
- Голубев А. И., Ахмедов А. М., Галдобина Л. П., 1984. Геохимия черносланцевых комплексов нижнего протерозоя Карело-Кольского региона. Л.: Наука. 193 с.
- Крайнов С. Р., Швец В. М., 1992. Гидрогеохимия. М.: Недра. 463 с.
- Металлогения Карелии, 1999. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 340 с.
- Минералогия и геохимия редких и радиоактивных металлов: Учебное пособие для вузов, 1987. М.: Энергоатомиздат. 360 с.
- Перельман А. И., 1979. Геохимия. М.: Высшая школа. 423 с.
- Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. 1987. Петрозаводск. 151 с.
- Asikainen U., 1981. Natural radioactivity of groundwater and drinking water in Finland // Inst. Radiat. Protect., Helsinki. STL-A39, 1981. 65 p.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЗАОНЕЖЬЯ

Н. В. ВИНОГРАДОВА

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Представлены результаты исследований радионуклидов в донных отложениях на Заонежском полуострове. В исследуемых образцах донных отложений содержание естественных радионуклидов семейства урана-238 и тория-232 находится в основном на уровне кларковых (10^{-4}). Наибольшее содержание урана и тория наблюдается в озерах Вандомозеро, Падмозеро и Путкозеро, что объясняется непосредственной близостью рудопроявлений. Во всех исследованных образцах, за исключением оз. Мягрозеро, обнаружен цезий-137. Наибольшая его концентрация наблюдается в оз. Ладмозеро (198 Бк/кг), и, видимо, это загрязнение связано с «чернобыльским следом».

N. V. VINOGRADOVA. DESCRIPTION OF RADIONUCLIDES IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE LAKES OF ZAONEZHYE

The results of radionuclides research in bottom sediments on Zaonezhye peninsula are presented in the report. The naturally occurring uranium-238 and thorium-232 series radionuclides content in the investigated samples is predominantly on the clark level (10^{-4}). The highest uranium and thorium content is reported in lakes Vandomozero, Padmzero and Putkozero. This fact can be explained by the immediate proximity of ore deposits. In all the samples except those collected in Myagrozero caesium-137 was detected. The highest caesium concentration is reported in lake Ladmzero (198 Bq/kg), and in this case pollution is obviously connected with the Chernobyl accident consequences.

Ключевые слова: радионуклиды, донные отложения, озера Заонежья.

Исследования донных отложений проводились на 10 наиболее крупных озерах Заонежья (рис. 6.1). Пробы анализировались методом гамма-спектроскопии на сцинтилляционном гамма-спектрометре СГС-200. Образцы в суховоздушном состоянии засыпались в контейнеры объемом 200 см³ и герметизировались с помощью клея ПВА, который наносился вдоль стыка контейнера и крышки. Через 14 дней, необходимых для установления равновесия Ra-226 с продуктами его распада, проводились измерения удельной активности радионуклидов. Для оценки погрешности результатов определения радионуклидов проводились повторные измерения.

В табл. 6.1 приводятся удельные активности естественных радионуклидов (ЕРН) и удельной эффективной активности ($A_{эфф}$), которая в соответствии с общепринятыми нормативами

(ГОСТ 30108-94) определялась по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K.$$

Содержание естественных радионуклидов (табл. 6.2) рассчитывалось по удельным активностям, приведенным в табл. 6.1.

Содержания урана рассчитаны по удельной активности радия-226, исходя из предположения, что между ураном и радием коэффициент радиоактивного равновесия приблизительно равен 1. Однако с учетом различного характера их поведения в зонах гипергенезиса радиоактивное равновесие между ними для донных осадков может быть нарушено. В исследуемых образцах донных отложений содержание естественных радионуклидов семейства урана-238 и тория-232 находится в основном на уровне кларковых (10^{-4}). Наибольшее содержание урана и радия наблюдается в озерах Вангомозеро, Падмозеро, Путкозеро, что объясняется

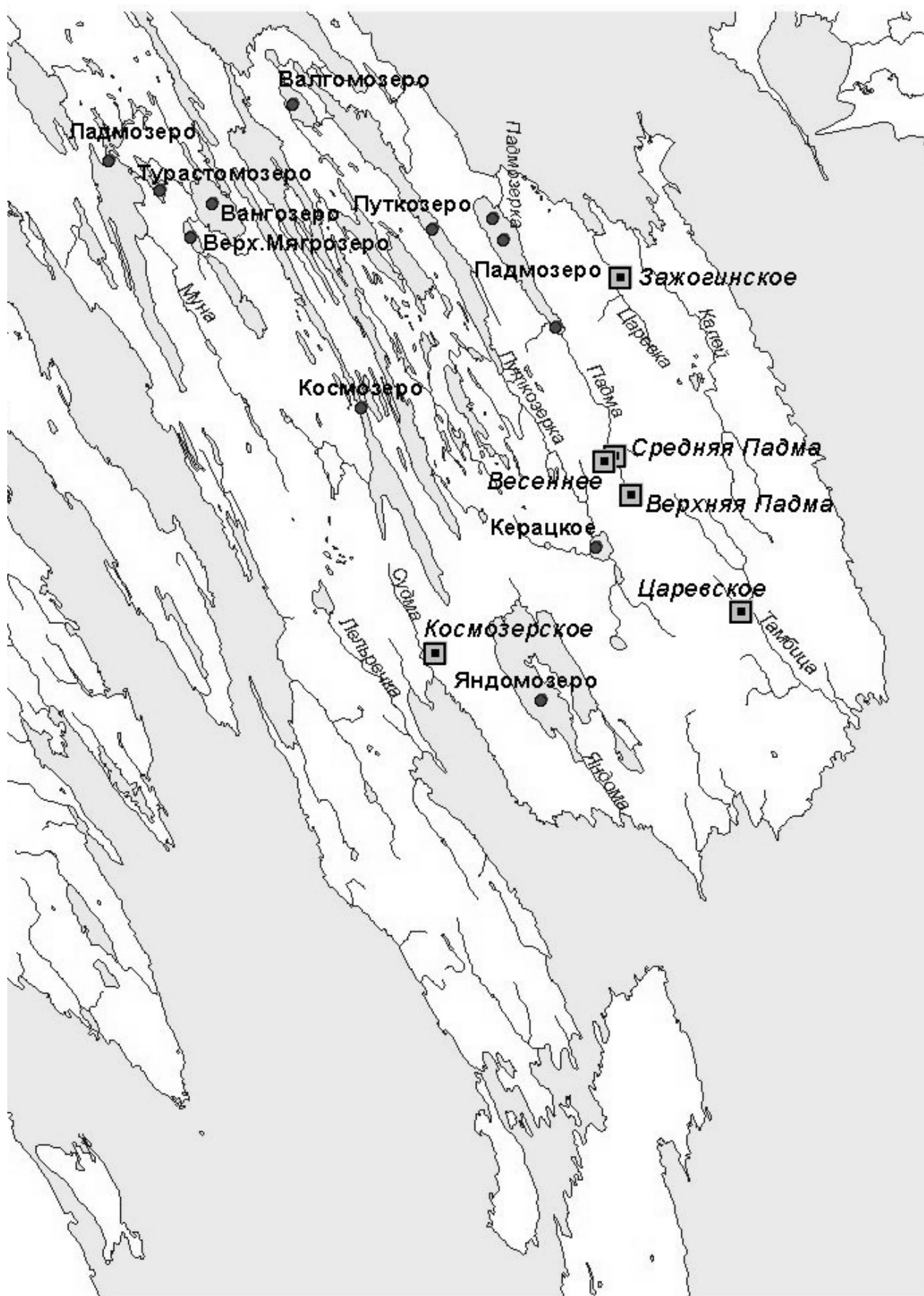


Рис. 6.1. Станции отбора проб донных отложений озер Заонежья

Таблица 6.1. Удельная активность естественных радионуклидов в пробах донных осадков озер Заонежья

Место отбора проб (водоем)	Количество измерений	Удельные активности ЕРН, Бк/кг						A _{эфф}	
		Торий-232		Радий-226		Калий-40			
		A _{Th}	δ	A _{Ra}	δ	A _K	δ	A _{эфф}	δ
Падмозеро	5	37	2,1	29,4	2,7	545	58	124	8,3
Путкозеро	4	41	5,8	29	2,6	529	49	127	7,7
Ладмозеро	4	36	10,5	14	7,6	415	27	96	12
Турастомозеро	6	17	3,8	5	4	152	32	40	6
Мягрозеро	6	17	2,8	20	5	170	21,8	57	5,8
Вангозеро	5	31	4,2	19	3,8	352	22	90	9
Вангомозеро	7	34	1,8	38	2,7	609	30	135	5,3
Яндомозеро	5	29	4,9	22	5,2	390	38	94	6
Космозеро	7	34	5,6	20	6,4	466	36	106	9,8
Падмозеро (1П)	5	32	3,2	28	3,7	471	68	109	12,5
Падмозеро (4П)	4	34	3	22	5	642	40	121	4
Керецкое	5	8	1,8	14	5,4	62	27	30	6,3

Таблица 6.2. Содержание ЕРН в пробах донных осадков озер Заонежья, %

Место отбора проб (водоем)	Кол-во измерений	Радий 10 ⁻¹¹	Уран 10 ⁻⁴	Торий 10 ⁻⁴	Калий
Падмозеро	5	7,0	2,4	8,9	1,7
Путкозеро	4	6,8	2,3	9,9	1,7
Ладмозеро	4	3,2	1,1	8,7	1,3
Турастомозеро	6	1,2	0,4	4,1	0,5
Мягрозеро	6	4,7	1,6	4,1	0,5
Вангозеро	5	4,4	1,5	7,5	1,1
Вангомозеро	7	8,8	3,0	8,2	2,0
Яндомозеро	5	5,3	1,8	7,0	1,2
Космозеро	7	4,7	1,6	8,2	1,5
Падмозеро (1П)	5	1,4	2,2	7,7	1,5
Падмозеро (4П)	4	2,4	1,8	8,2	2,1
Керецкое	5	3,2	1,1	1,9	0,2

непосредственной близостью рудопроявлений. Следует отметить, что во всех без исключениях объектах содержание тория выше содержания урана. Это свидетельствует о том, что торий хорошо сорбируется глинистыми отложениями, гидроокислами железа и богатыми органическим веществом донными илами.

Для оз. Падмозеро была сделана колонка донных отложений и изучено распределение ЕРН (табл. 6.3; рис. 6.2).

Таблица 6.3. Изменение содержания урана, тория по глубине, мкг/г

Column	Th	U
Зп 0–1,5 см	12,571	2,649
Зп 1,5–3 см	11,688	2,760
Зп 3–4,5 см	13,255	2,963
Зп 4,5–8 см	13,074	3,091
Зп 8–10 см	13,796	3,206
Зп 10–12 см	14,141	2,786
Зп 12–14 см	14,016	2,810
Зп 14–16 см	14,475	2,962
Зп 16–18 см	14,042	2,852
Зп 18–20 см	14,809	2,958
1п 0–5 см	10,991	2,572
1п 5–13 см	11,817	3,314

Распределение металлов по глубине иловой колонки изучалось на примере керна донных отложений (0–20 см), отобранного на глубине 15 м. Концентрационные профили урана и тория демонстрируют более низкие их содержа-

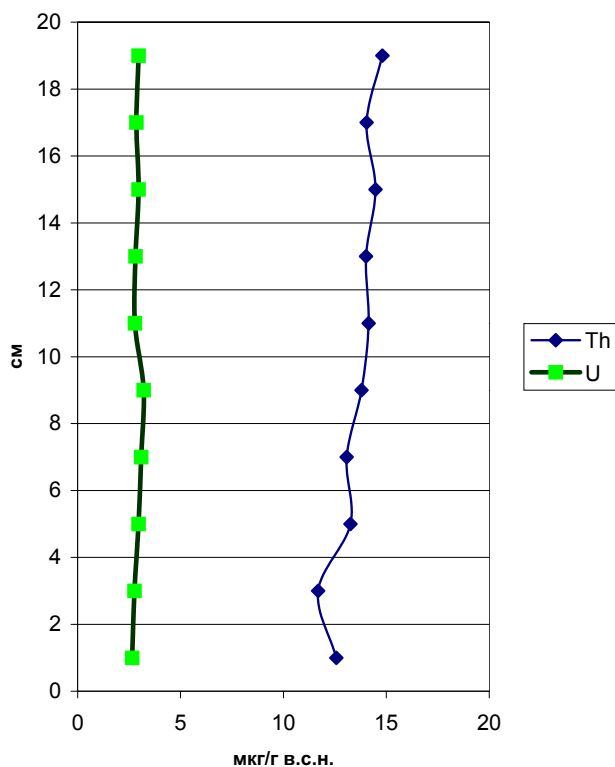


Рис. 6.2. Вертикальное распределение урана и тория в кернах донных отложений

ния в поверхностном слое, чем в толще осадка. Анализ содержания U в донных отложениях, залегающих в районе устья р. Падмы, показал, что его концентрация в слое 0–5 см в 1,5 раза ниже, чем в слое 5–13 см (U – 2,6 и 3,3 мкг/г). Для тория концентрации в этих слоях отличались лишь в 1,07 раза (10,991 и 11,817 мкг/г соответственно). Причиной этого могут быть как особенности миграции этих элементов – накопление менее подвижных форм с органическим веществом, так и более высокое поступление этих элементов в донные отложения в период геологоразведочных работ в районе уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма.

Во всех исследованных образцах, за исключением оз. Мягрозеро, обнаружен цезий-137 (табл. 6.4). Наибольшая его концентрация

Таблица 6.4. Удельная активность цезия-137 в донных отложениях озер Заонежья

Место отбора проб (водоем)	Количество измерений	Удельная активность цезия-137, Бк/кг			Стандартное отклонение
		минимальная	максимальная	среднее значение	
Падмозеро	3	64	75	71	5,6
Путкозеро	3	103	125	72	4,7
Ладмозеро	3	180	224	198	23
Турастомозеро	5	6	26	20	4,6
Мягрозеро	5	2	8	5	3,1
Вангозеро	4	142	151	147	3,9
Вангомозеро	6	45	55	51	3,6
Яндомозеро	4	133	163	150	12
Космозеро	6	121	146	124	7,6
Падмозеро (1П)	4	44	52	47	3,7
Падмозеро (4П)	4	63	71	67	3,5
Керецкое	4	14	24	20	4
Контрольная проба, глина из Великой губы	5	0,3	2,93	1,54	1,4
Контрольная проба, Ситозеро (диабаз)	3	0,3	1,7	0,9	0,7

наблюдается в оз. Ладмозеро (198 Бк/кг), и, видимо, это загрязнение связано с «чернобыльским следом».

Для оценки предела обнаружения Cs-137 приводятся результаты по двум фоновым контрольным пробам.

Таким образом, по результатам проведенных гамма-спектрометрических измерений на лабораторном гамма-спектрометре СГС-200

и сравнения их с действующими нормативами по радиационно-гигиенической оценке можно сделать заключение, что в представленных пробах донных осадков распределение ЕРН близко к фоновым.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-05-97513).

ПРОГНОЗИРУЕМОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД РАДИОНУКЛИДАМИ ПРИ ДОБЫЧЕ ВАНАДИЕВОГО СЫРЬЯ

Р. В. БОГДАНОВ¹, Н. В. ВИНОГРАДОВА², Е. А. ШИЛОВСКАЯ¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Настоящее исследование выполнено на примере одного из разведанных, но еще не эксплуатируемых месторождений уран-ванадиевых руд в северо-западном регионе России (Средняя Падма, Карелия). Изучено выщелачивание радионуклидов уранового ряда из образцов урансодержащей ванадиевой руды под действием модельных растворов атмосферных осадков и грунтовых вод. Результаты нормированы на геометрическую поверхность образцов, длительность выщелачивания и объем выщелачивающего раствора. Показано, что выщелачивание радия-226 из образцов роскоэлиты с концентрацией урана 0,22% незначительно. Зафиксировано вымывание радия и урана из брекчии по роскоэлиту, где содержание урана составляет 0,81%. Нормированные величины содержаний радия и урана в полученных растворах превышают уровни вмешательства (предельно допустимые концентрации радионуклидов в питьевой воде). Наиболее подвижными под действием жидкой фазы оказываются радионуклиды цепочки $^{210}\text{Pb} - ^{210}\text{Bi} - (^{210}\text{Po})$, активность которых в модельном растворе грунтовых вод в 4–5 раз превышает активность изотопов урана.

R. V. BOGDANOV, N. V. VINOGRADOVA, E. A. SHILOVSKAYA. FORECAST RADIONUCLID'S POLLUTION OF NATURAL WATERS IN THE PROCESS OF GETTING OF THE VANADIUM RAW MATERIAL

This research was based on one of the uranium-vanadium ore deposits in the north-western part of Russia, which have already been explored but have not been operated yet (Srednyaya Padma, Karelia).

In this research the process of leaching of uranium series radionuclides from uranium containing vanadium ore samples treated by model solutions of precipitation and subterranean waters was studied. The results are standardized for the geometrical area of the samples, leaching process duration and leaching solution volume.

The data obtained showed that the leaching of radium-226 from roscoelite samples with uranium concentration of about 0,22% is low. Radium and uranium scavenging from roscoelite breccia where uranium concentration is 0,81%, is clearly observed. Standardized values of radium and uranium content in the obtained solutions exceed interference standards (maximum permissible radionuclides concentrations in drinking water). The highest mobility rate under the influence of liquid phase is displayed by the radionuclides of the $^{210}\text{Pb} - ^{210}\text{Bi} - (^{210}\text{Po})$ series. Their activity in the model subterranean water solution is 4-5 times higher than the uranium isotopes activity.

Ключевые слова: уран-ванадиевые руды, выщелачивание, изотопы.

Введение

Элемент № 23 ванадий широко используется в народном хозяйстве и, в частности, в металлургии. Поэтому поиск и освоение месторождений

ванадиевых руд всегда относились к важным научным и прикладным задачам. В настоящее время роль ванадия в развитии современного общества значительно возрастает в связи с открывающимися перспективами изготовления эконо-

мичных и энергоемких ванадиевых аккумуляторов, пригодных для накопления и хранения больших запасов электроэнергии (Skylas-Kazacos, Menitas, 1997; Hawkins, Robbins, 1999; Blake et al., 2001). Уже сейчас ванадиевые аккумуляторы емкостью 2 МВт/ч помогают поддерживать необходимое напряжение в городских электрических сетях в часы пик в масштабах штата Юта (США). Нельзя исключить, что эта новая роль ванадия способна совершить технологический прорыв в таких областях, как электротехника, автомобилестроение, телекоммуникации и др. В свою очередь, такой прогресс вызовет повышенный спрос на ванадий и его минеральное сырье, что приведет к интенсификации разработок месторождений ванадиевых руд.

Однако известно, что рудные концентрации ванадия в его месторождениях среди осадочных толщ, особенно высокоуглеродистых, нередко сопровождаются повышенным содержанием урана в виде урановых минералов разнообразной природы. Промышленная разработка таких месторождений в той или иной степени связана с повышенной радиоэкологической нагрузкой на окружающую среду и, в частности, с загрязнением природных вод ураном и продуктами его радиоактивного распада. Представляется необходимым проведение комплекса предварительных исследований, на основании которых можно было бы дать прогноз о степени ожидаемого радиоактивного загрязнения окружающей среды. Настоящее исследование выполнено на примере одного из разведанных, но еще не эксплуатируемых месторождений уран-ванадиевых руд в северо-западном регионе России (Средняя Падма, Карелия). Экспериментальная задача состояла в изучении выщелачивания урана и некоторых продуктов его радиоактивного распада из урансодержащей ванадиевой руды (роскоэлитового слюдита) под действием модельных атмосферных осадков и модельных растворов подземных вод, дренирующих месторождение.

Описание образцов руды

Гранулометрический состав. Для работы были отобраны два образца роскоэлитового слюдита с месторождения Средняя Падма, которые содержали примеси вторичных минералов урана. Первый образец (далее № 1) – роскоэлитовый слюдит $[K(V, Al, Mg)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2]$ – получен из скважины № 4836, с глубины 113,7 м. Микронзондовый анализ показал наличие в нем карнотита ($KUO_2VO_4 \cdot 1,5H_2O$), клаустелита ($PbSe$), калиевого полевого шпата, самородного золота. Второй образец (далее № 2) – брекчия по роскоэлитовому слюдиту – содержит минералы: карнотит, тьямунит ($Ca_{0,5}UO_2VO_4 \cdot 2H_2O$) (скважина № 2822, глубина 148,6 м).

Приготовленные образцы измельчались в железной ступке и разделялись на гранулометрические фракции с помощью набора аналитических сит: 0,50–0,25; 0,25–0,12; 0,12–0,07;

<0,07 (мм). Поверхность образцов рассчитывалась по следующим формулам (Андреев и др., 1959):

(1) Средний диаметр частиц – $d_{ср} = (d_2 - d_1) / (\ln d_2 - \ln d_1)$, где d_2 и d_1 – максимальный и минимальный размер частиц.

(2) Коэффициент формы частиц – $K_{\phi} = 42,26 \sqrt{d_{ср}}$.

(3) Удельная поверхность – $S_{уд} = 6K_{\phi} / \rho d_{ср}$ (см²/г), где $d_{ср}$ – средний диаметр частиц, см, а ρ – плотность фракций, г/см³.

(4) Общая поверхность фракции – $S_{общ} = m S_{уд}$ (см²), где m – масса, г.

(5) Суммарная поверхность всех фракций – $S_{сум} = S_{общ1} + S_{общ2} + S_{общ3} + S_{общ4}$.

Суммарная поверхность ($S_{сум}$) для образца № 1 составляла 1,1 м², а для образца № 2 – 0,35 м². Данные расчета поверхности для каждой фракции образцов представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Характеристика гранулометрических фракций образцов

Фракция, мм	$d_{ср}$, мм	K_{ϕ}	$S_{уд}$, см ² /г	m , г	ρ , г/см ³	$S_{общ}$, см ²
Образец № 1						
0,25–0,50	0,36	2,54	145,9	10,18	2,9	1485,98
0,12–0,25	0,17	1,83	230,67	10,65	2,8	2456,66
0,07–0,12	0,09	1,38	353,85	14,74	2,6	5215,69
0,01–0,07	0,03	1,00	600	2,993	3,3	1795,8
Образец № 2						
0,25–0,50	0,36	2,54	145,97	4,99	2,9	728,39
0,12–0,25	0,17	1,83	230,67	2,98	2,8	687,40
0,07–0,12	0,09	1,38	353,85	3,97	2,6	1404,79
0,01–0,07	0,03	1,00	600	1,13	3,3	678

Радиоактивность ванадиевой руды. После разделения образцов на гранулометрические фракции радиоактивность каждой измерялась в течение 1 ч на гамма-спектрометре с детектором Ge (Li) объемом 60 см³ и многоканальным анализатором АМА02-Ф1 с компьютерной обработкой спектров. Измерения проводились в стандартных боксах, в этой же геометрии был изготовлен эталон U из металлического U. При измерении спектров выявлено отсутствие дочерних изотопов Th-232. Наблюдались только гамма-линии, соответствующие ряду U – Ra. Определение U-238 производилось по линиям радия и продуктов его радиоактивного распада: 185 кэВ (Ra-226), 352 кэВ (Pb-214), 609 кэВ (Bi-214). Содержание урана (мг/г) и величины радиоактивности нуклидов (Бк/г) приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Концентрация урана-238 и удельная активность проб

№ фракции	m , г	Размер фракции, мм	U-238, мг/г	Ra-226, Бк/г	Pb-214, Бк/г	Bi-214, Бк/г
1 – 1	10,181	0,25–0,50	2,29	27,7	24,2	24,8
1 – 2	10,649	0,12–0,25	2,24	27,2	22,8	23,8
1 – 3	14,742	0,07–0,12	2,08	25,1	21,8	23,3
1 – 4	2,933	0,01–0,07	2,64	32,0	27,3	28,1
2 – 1	4,989	0,25–0,50	7,27	88,0	87,4	84,5
2 – 2	2,981	0,12–0,25	8,55	103,5	99,6	103,4
2 – 3	4,018	0,07–0,12	7,55	91,5	84,5	82,3
2 – 4	1,176	0,01–0,07	11,9	144,3	125,6	124,0

В открытых геохимических системах между радием и продуктами его распада может не быть полного радиоактивного равновесия (из-за потери радона), что и нашло отражение в полученных результатах. Поэтому расчет содержания урана-238 проводился по активности радия, исходя из того, что вклад радия в линию 185 кэВ составляет долю, равную 0,56, а вклад изотопа U-235 – 0,44. В соответствии с этим для расчета концентрации урана (C_U) использовалась формула:

$C_U = (N_{185} \times 0,44 \times 68,94) : 3486,5 \text{ (мг/г)}$,
где N_{185} – суммарный счет по линии 185 кэВ имп/ч радия и урана; 68,94 мг – количество урана в эталоне; 3486,5 имп/ч – счет эталона урана. Эталон урана – модель реальной пробы с использованием металлического урана массой 68,94 мг.

Удельные активности (Бк/г) определялись по формулам:

$Ra-226 = (N_{185} \times 0,56) : (3600 \times 0,045 \times 0,0328) \text{ Бк/г}$,
где 0,045 – эффективность детектора по линии 185 кэВ; 0,0328 – выход линии 185 кэВ для Ra-226;

$Pb-214 = N_{352} : (3600 \times 0,017 \times 0,37) \text{ Бк/г}$,
где 0,017 – эффективность детектора по линии 352 кэВ; 0,37 – выход линии 352 кэВ в спектре.

Для Bi-224 (609,4 кэВ) эти величины соответственно составляют 0,008 и 0,461. Для эталонирования по линиям 352 и 609 кэВ (точнее, для определения эффективности их регистрации детектором) использовали диск из медной фольги диаметром 4,5 мм, экспонированный в источнике торона. Активность диска с нанесенным активным осадком Pb-212 и продуктов его распада сравнивали с активностью источника Eu-152 из ОСГИ, определялась абсолютная активность медного диска. Затем диск растворяли и готовили модельную активность для определения эффективности счета импульсов с энергией 352 и 609 кэВ в реальных условиях выполнения гамма-спектрометрического анализа.

Из приведенных в табл. 7.2 данных видно, что больше всего обогащены радионуклидами уранового ряда фракции образцов с наименьшим размером зерен. Это легко понять, если учесть, что урановые минералы обладают наименьшей твердостью и при измельчении проб попадают в наиболее мелкие фракции. Полное содержание урана в образце № 1 – 85,574 мг, в образце № 2 – 106,09 мг. Учитывая, что масса первого – 38,505 г, а второго – 13,164 г, концентрация урана в образце № 1 составляет 0,22%, в образце № 2 – 0,81%. Указанные содержания соответствуют активностям урана-238 (радия-226): 1035,5 Бк (№ 1) и 1284,9 Бк (№ 2).

Характеристика модельных растворов

В качестве модельных атмосферных осадков использовалась дистиллированная вода, через которую в течение суток прокачивался

воздух. Значение pH дистиллированной воды при этом повышалось от 6,9 до 7,4. Измерение величин pH выполнялось на pH-метре-милливольтметре pH-410. Погрешность прибора не более 0,02 ед. pH.

Модельный раствор природных вод готовился соответственно составу воды из скважины № 2852 с месторождения Средняя Падма. Для приготовления модельного раствора использовались следующие соли: $NaHCO_3$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $Mg(NO_3)_2$, KCl , NH_4Cl , $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$, $NaCl$, Na_2SO_4 . В табл. 7.3 указаны составы природного и модельного растворов.

Таблица 7.3. Состав природной минеральной воды и модельного раствора

Ионы, мг/л	Природная вода	Модельный раствор
$[NH_4]^+$	1,2	1,2
Na^+	301,5	243,1
K^+	6,7	6,7
Ca^{2+}	38,2	38,2
Mg^{2+}	33,7	0,1
Fe^{2+}	0,1	0,1
Fe^{3+}	0,4	0,4
Sum	381,8	323,3
$[HCO_3]^-$	350,2	350,2
Cl^-	335,7	335,7
$[SO_4]^{2-}$	31,1	31,1
$[NO_3]^-$	0,4	0,4
Sum	717,4	717,4
pH	7,81	7,81

Величина pH = 7,81 свидетельствует о том, что данные природные воды относятся к слабо-щелочным растворам, благоприятствующим переносу анионогенных элементов.

Процедура выщелачивания

Все четыре фракции образца тщательно перемешивались и помещались в делительную воронку (объемом 1 л). Через слой порошка № 1 последовательно пропускалось 5 л азрированной воды для моделирования атмосферных осадков, а затем 1 л минерализованной воды. Через образец № 2 пропускался 1 л азрированной воды, а затем 1 л минерализованной воды. Время пропускания одного литра воды через образцы составляло от 36 до 72 ч. Выщелачивание проводилось при комнатной температуре. Из каждого полученного литра раствора после выщелачивания отбиралось 600–800 мл для определения содержания U. При пропускании модельных растворов через порошки руды pH минерализованной воды увеличивался на 1, pH азрированной воды – на 0,3. Поэтому при хранении полученных выщелатов маточные растворы подкислялись соляной кислотой до pH 1–2.

Радиоаналитические процедуры

Методика соосаждения радия с сульфатом бария. Проба воды (600–800 мл) подкислялась 2 мл 6 моль/л HCl, нагревалась, и к горячему

раствору добавлялось 0,3 г BaCl_2 . При перемешивании в раствор добавляли 25 мл серной кислоты (1 : 5). выпадающий осадок сульфата бария увлекал за собой Ra и Pb, а уран оставался в растворе. Раствор с осадком доводили до кипения и оставляли на ночь при комнатной температуре (Радиометрические методы..., 1968). На следующий день осадок отфильтровывали через два фильтра «синяя лента» (предварительно взвешенные). Сухой осадок вместе с фильтром взвешивали и выясняли массу осадка на фильтре. По результатам холостых опытов осаждения сульфата бария выявлено, что при фильтровании осадка через два фильтра «синяя лента» теряется 24% массы осадка, а через четыре фильтра – 5%. В каждом случае измеряемую активность пересчитывали на 100% выхода осадка BaSO_4 .

Методика выделения урана. Для выделения урана отбиралось 100 мл раствора, полученного в результате выщелачивания, куда добавлялось определенное количество трассера U-232, раствор упаривался до влажных солей, а затем переводился в HCl-форму трехкратным упариванием с раствором 6 моль/л HCl. Для выделения урана готовилась хроматографическая колонка, наполненная смолой Дауэкс-2. Стандартный промывочный цикл включал последовательное промывание колонки 15 мл воды, 15 мл раствора 0,1 моль/л HCl, 15 мл 6 моль/л HCl. К упаренной фракции добавлялось 5 мл 6 моль/л HCl и аскорбиновая кислота (до концентрации 0,57 моль/л). Этот раствор наносился на колонку. Сосуд с урановой фракцией еще 2 раза обмывали раствором 6 моль/л HCl. (Аскорбиновая кислота использовалась для восстановления трехвалентного железа в составе урановой фракции перед нанесением на колонку.) Колонка промывалась 20 мл раствора 6 моль/л HCl для очистки фракции урана от других радионуклидов. Затем уран вымывался в 15 мл раствора 0,1 моль/л HCl и в 20 мл воды. Элюат выпаривался досуха и готовился для проведения электролиза.

Источники для альфа-спектрометрического определения урана изготавливались методом молекулярного электроосаждения урана из среды формиата аммония и хлорной кислоты при напряжении 10 В ($I = 100$ мА). Катодом служил полированный никелевый диск с площадью активного пятна примерно 2 см², анодом – платиновая проволока в виде спирали на конце. Расстояние между катодом и анодом составляло 1,0–1,5 см. Электролиз проводился в тefлоновой ячейке (объемом 4 мл) с водяным охлаждением катода. Продолжительность электролиза составляла 1,5–2 ч в зависимости от содержания урана. Перемешивание раствора происходило за счет выделения газа в процессе электролиза. По окончании электролиза источник сушился под инфракрасной лампой. Толщина источников составляла 100–200 мкг/см².

Измерение радиоактивности препаратов. Измерение активности осадка BaSO_4 . Выполнялся двойной контроль радиоактивности препаратов:

1. Гамма-излучения радионуклидов Ra-226, Pb-214 (Ra B), Bi-214 (Ra C) с соответствующими энергиями линий 185, 352 и 609 кэВ. Гамма-спектрометр включал Ge (Li) детектор объемом 60 см³ и многоканальный анализатор АМА02-Ф1. Длительность измерений препаратов составляла 1–2 ч.

2. Бета-излучений группы радионуклидов, куда могут входить, помимо Pb-214 и Bi-214, также и Pb-210 (Ra D) и Bi-210 (Ra E). Измерения выполнялись на стандартном радиометре Strahlungsmessgerat 20046 с газоразрядным торцевым детектором, калибровка которого проводилась по эталону Bi-210 с активностью 15 ± 3 Бк.

Контроль альфа-активности источников. Регистрация альфа-излучения полученных источников проводилась на спектрометре с полупроводниковым поверхностно-барьерным Si (Au) детектором площадью 10 см² (с собственным разрешением 50 кэВ), зарядочувствительным предусилителем и 4096-канальным анализатором класса АИ-1024-95. Длительность измерения одного источника составляла от 24 до 72 ч. Альфа-спектры трех природных изотопов урана и трассера (U-232) анализировались по программе, разработанной на кафедре радиохимии СПбГУ (Богданов и др., 1995). Перевод полученной активности в имп/ч на активность в Бк/л производился по эталонному источнику U-232 с известной активностью 0,165 Бк/л.

Результаты экспериментов и обсуждение

Результаты гамма-спектрометрии. В осадках BaSO_4 из первых 5 л пропущенных через образец № 1 модельных атмосферных осадков не было обнаружено активности ни одного из определяемых методом гамма-спектрометрии нуклидов. В шестом осадке, полученном при выщелачивании образца № 1 модельным раствором подземных вод, была отмечена гамма-активность нуклидов Pb-214 и Bi-214 на пределе обнаружения. В противоположность первому образцу образец № 2 показал наличие гамма-активности не только в элюатах минерализованной воды, но и в элюатах аэрированной воды. Результаты измерения гамма-активности представлены в табл. 7.4.

Данные, приведенные в табл. 7.4, рассчитаны с учетом выхода линий (352 кэВ и 609 кэВ) и эффективности их регистрации (37% и 46% и 0,02 и 0,01 соответственно).

Таблица 7.4. Гамма-активность Pb-214 и Bi-214 в элюатах, Бк/л

№ образца – № литра	Pb-214	Bi-214
1 – 6	$2,1 \pm 1$	1 ± 1
2 – 1	$4,8 \pm 1$	$5,3 \pm 1$
2 – 2	$8,1 \pm 1$	$7,8 \pm 1$

Результаты бета-радиометрии. Измерение бета-излучений является интегральным методом исследования образцов. Бета-активность осадков BaSO_4 может принадлежать четырем излучателям в ряду распада Ra-226 , а именно: Pb-214 , Bi-214 , Pb-210 , Bi-210 . В табл. 7.5 представлены данные по суммарной бета-активности препаратов BaSO_4 , измеренных четырехкратно с экспозицией 1000 с.

Таблица 7.5. Бета-активность литра элюата модельных растворов

№ образца – № элюата	$N_{\text{ср}}$, имп, $t = 1000$ с	$N_{\text{ср}}$, имп, $t = 1000$ с	Погрешность, имп.	Активность, Бк/л	t выщелачивания, ч
1 – 1	258	31	10	13 ± 5	48
1 – 2	283	56	10	4 ± 1	36
1 – 3	337	110	11	6 ± 1	36
1 – 4	444	217	12	8 ± 2	36
1 – 5	264	37	10	7 ± 2	36
1 – 6	674	447	14	27 ± 5	72
2 – 1	1277	1050	17	75 ± 14	24
2 – 2	1073	846	17	103 ± 21	24
Фон	227		7		
Эталон	1467	1240	20	15 ± 3	

Величины бета-активности осадков BaSO_4 , нормированные на 1 м^2 поверхности проб ванадиевой руды и на 1 сут выщелачивания радионуклидов модельными растворами, представлены в табл. 7.6. При расчетах абсолютной активности, приписываемой нуклиду Pb-210 , учитывалась абсолютная активность Pb-214 и Bi-214 , найденная в гамма-спектрометрических экспериментах. Относительная погрешность определений – 20%.

Таблица 7.6. Нормированная активность бета-излучателя Pb-210 в 1 л элюата модельных растворов

№ образца – № элюата	Полная активность, Бк/л · м^2 · сут	Активность Pb-210 , Бк/л · м^2 · сут
1 – 1	6	6
1 – 2	4	4
1 – 3	4	4
1 – 4	5	5
1 – 5	4	4
1 – 6	8	6
2 – 1	214	204
2 – 2	294	278

Результаты альфа-спектрометрического анализа. В табл. 7.7 представлены данные по выщелачиванию двух изотопов урана: U-234 , U-238 из первого и второго образцов. Результаты получены с точностью 10%.

Таблица 7.7. Активность изотопов урана в элюатах

№ образца – № элюата	Акт. U-238 , имп/ч · л	$A(\text{U-234})/A(\text{U-238})$, Бк/Бк	Акт. U-234 , имп/ч · л	Акт. U-238 , Бк/л	Нормированная акт. U-238 , Бк/л · м^2 · сут	Количество выщелоченного урана-238, %
1 – 4	1738	1,436	2496	1,58	0,96	0,13
1 – 5	1674	1,125	1883	1,52	0,92	0,12
1 – 6	5470	1,094	5980	4,96	1,5	0,21
2 – 1	9455	1,037	9805	8,57	25	2,1
2 – 2	21 773	1,033	22 492	19,73	56	4,9

Полученные в работе данные показали, что выщелачивание радия-226 из образцов роскээлита с концентрацией урана в интервале 0,22% незначительно. Радиоактивность нуклида ^{226}Ra и его дочерних продуктов ^{214}Pb и ^{214}Bi в большинстве случаев лежит на уровне или ниже порога определения. Из брекчии по роскээлиту, где содержание урана достигает 0,81%, вымывание радия четко фиксируется. Нормированное значение содержания радия в модельных атмосферных осадках составляет $14 \text{ Бк/л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}$, в подземных водах – 22. Уран вымывается несколько интенсивнее, особенно под действием минерализованных природных вод (содержание урана составляет до $56 \text{ Бк/л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}$). Нормированные величины содержания урана и радия в полученных растворах превышают уровни вмешательства (предельно допустимые нормы содержания радионуклидов в питьевой воде) соответственно в 20÷40 раз (Нормы..., 1999). При этом изотоп ^{234}U переходит из породы в воду атмосферных осадков в предпочтительной степени. Отношение активностей изотопов $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ для некоторых вытяжек достигает 1,4, что свидетельствует о вкладе ядерно-химических эффектов в процессы выщелачивания радиогенных нуклидов.

Наиболее подвижными под действием жидкой фазы оказываются радионуклиды цепочки $^{210}\text{Pb} - ^{210}\text{Bi} - (^{210}\text{Po})$. При содержании урана в брекчии по роскээлиту 0,81% нормированные значения активности растворов выщелатов по нуклиду ^{210}Pb достигают $204 - 278 \text{ Бк/л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}$. Анализ данных на основе НРБ-99 (Нормы..., 1999) показывает, что эти величины превосходят уровни вмешательства ($0,2 \text{ Бк/л}$) в сотни и более раз. Для дополнительного доказательства того, что в источниках фиксируется именно бета-активность цепочки распадов ^{210}Pb , осадки сульфата бария подвергались мягкой обработке соляной кислотой. Полученные растворы упаривались и измерялась альфа-активность полученных осадков. Альфа-спектры показали присутствие альфа-излучателя с верхним энергетическим порогом излучения 5,3 МэВ, т. е. ^{210}Po . Поскольку полоний находится в secularном равновесии с нуклидом ^{210}Pb , его радиоактивность равна радиоактивности материнского изотопа свинца, а уровень вмешательства установлен еще ниже – $0,12 \text{ Бк/л}$ (Нормы..., 1999). Эти результаты позволяют сделать вывод о прогнозируемом опасном загрязнении водной экосистемы Заонежья

группой бета-альфа-излучателей уранового ряда в случае промышленного освоения месторождения ванадиевых руд Средняя Падма.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02-05-97513).

Литература

- Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А., 1959. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат. 437 с.
- Богданов Р. В., Козак П. П., Тупицын И. И., 1995. Алгоритм и программа обсчета альфа-спектров для случая трех пиков // Вестник СПбГУ, сер. 4, № 4. С. 65–71.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы, 1999. М.: Минздрав России. 116 с.
- Радиометрические методы анализа естественных элементов, 1968 / Под ред. Е. И. Железновой, И. П. Шумилина, Б. Я. Юфа. М.: Недра. С. 236.
- Blake D. W. et al., 2001. Update on Energy Storage Based Power Quality Applications in South Africa. ESA Spring meeting. Chattanooga, USA.
- Hawkins J. M., Robbins T. Vanadium Energy Storage System. Concepts for Telecommunications Applications. INTELEC'99. P. 27–33.
- Skyllas-Kazacos M., Menitas C. The Vanadium Redox Battery for Emergency Back-up Applications. INT-ELEC'97. P. 463–471.

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕР ЗАОНЕЖСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Н. А. БЕЛКИНА

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Представлены результаты исследований донных отложений, проведенных Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН на Заонежском полуострове. По результатам первого периода (1961–1962) составлены схемы распределения различных типов грунтов 11 озер, определен гранулометрический состав осадков и содержание органического вещества. Исследование донных отложений по программе мониторинга в 1999–2001 гг. показало стабильность химического состава осадков и выявило на территории полуострова озера с разным типом накопления донных отложений.

N. A. BELKINA. SEDIMENTS OF LAKES OF ZAONEZHYE PENINSULA

The results of NWPI investigation of sediments in lakes of Zaonezhye peninsula and comparison with the earlier data are presented. During the first period (1961-62) the sediments were sampled at 11 lakes for study of grain size, organic content and sediment distribution. During the second period (1999-2001) the monitoring studies of surface sediments chemistry showed stability of sediment chemical composition up to present. Diversity of geological and limnological factors, affected on sediments forming, determines the different types of lake sedimentation these lakes.

Ключевые слова: донные отложения, механический и химический состав.

Введение

Первые сведения о донных отложениях озер Заонежского полуострова были опубликованы в 1915 г. Краткая характеристика осадков этих озер дана П. Ф. Домрачевым в сборнике «Озера Заонежья» в 1929 г. и в справочнике «Озера Карелии» в 1959 г. (Власова, 1965). Более подробно донные отложения озер Заонежья исследовались Отделом водных проблем КФАН СССР в 1961–1962 гг. Основной целью этих работ было составление карт поверхностного слоя донных отложений, которые опубликованы в каталоге донных отложений озер Карелии (Васильева, Поляков, 1992). В местах распространения наиболее характерных для озер типов грунтов исследовались стратификация иловых монолитов, гранулометрический и химический состав донных отложений (Васильева, 1965; Власова, 1965). В 1991 и 1999–2001 гг. по программе мониторинга водных объектов Карелии с целью характеристики современного состояния донных отложений был произведен отбор проб иловых осадков зон аккумуляции 12 озер.

В геоморфологическом отношении Заонежский полуостров делится на восточную и западную части. В районе западного Заонежья исследованы донные отложения озер Вангозеро, Ладмозеро, В. Мягозеро, Турастамозеро, Нижнее и Верхнее Пигмозеро.

В районе восточного Заонежья были исследованы донные отложения озер Путкозеро, Падмозеро, Валгомозеро, Яндомозеро, Керецкое и Космозеро.

Методы

Отбор проб донных отложений производился дночерпателем Экмана-Берджа, трубкой ГОИН, поршневой трубкой собственной конструкции (модифицированный вариант стратометра Алексона) (Hakanson, Jansson, 1983). Монолит донных отложений оз. Падмозеро был разделен на 10 частей в соответствии с генетическими слоями. Для учета пространственной неоднородности в месте отбора проб на каждой станции одновременно отбиралось по 3–4 монолита донных отложений, одинаковые

фракции которых объединялись и использовались для дальнейшей обработки. Толщина окисленного слоя (z) оценивалась визуально или по величине Eh. Во влажных образцах донных отложений определялись: естественная влажность, пористость (термостатированием навески точного объема натурального ила при температуре 105 °С до постоянного веса), аммонийный азот (микродиффузионный метод Конвея), железо, марганец и лабильный фосфор (спектрофотометрическое определение после кипячения с H₂SO₄). В поверхностном слое осадка определялись концентрации нефтепродуктов (ИК-спектрометрический метод) и растительных пигментов (экстракция ацетоном, спектрофотометрический метод). В образцах воздушно-сухого грунта определялись: потери при прокаливании (ппп; озолении при температуре 550 °С в течение 1 ч), азот общий и фосфор общий (метод Кьельдаля, титриметрическое и фотометрическое окончание, соответственно), органический углерод (метод Тюрина), микроэлементы (ICP-MS).

Результаты и обсуждение

Главными факторами, определяющими осадконакопление озер Заонежского полуострова, являются географическое положение, глубина рельефа эрозионного вреза котловины и литологическая основа покровных пород. Осадкообразование происходит здесь при разных сочетаниях геологических, ландшафтных и физико-химических обстановок.

Геологическое прошлое района обусловило разнообразие форм озерных котловин. К участкам основных тектонических разломов приурочены провально-тектонические котловины Ладмозера, Космозера, Путкозера. Они характеризуются чередованием узких щелей и ям с участками спокойного подводного рельефа. В разных частях района встречаются котловины тектонического происхождения, в значительной степени преобразованные ледником, – тектонико-ледниковые, например, Вангозеро, Валгомозеро и Падмозеро. В Заонежье встречается также тип ледниковых котловин: озера Мягрозера, Яндомозера.

Преобладающим типом донных отложений исследованных водоемов являются илы (табл. 8.1). Зона их залегания определяется глубиной озера, крутизной склонов и динамикой вод. Схемы распределения поверхностного слоя донных отложений пяти озер, составленные по данным работ, проведенных в 1961–1962 гг., представлены в «Каталоге озер Карелии» (Васильева, Поляков, 1992).

Илы серого цвета характерны для водоемов с малыми скоростями осадконакопления (Космозеро, Путкозеро, Ладмозеро). По структуре выделяются органические илы озер Мягрозера, Кереецкого и Турастамозера, близкие по химическому составу к сапропелям. В ряде проб донных отложений из озер Путкозера, Падмозера, Яндомозера отмечены включения графитовой материнской породы черного цвета. Твердый, песчано-гравийный тип донных отложений широко представлен в зоне литорали. Для всех озер характерно значительное развитие глинистых осадков. В табл. 8.2 представлен механический состав грунтов зон аккумуляции для восьми озер.

По исследованиям Т. С. Власовой (1965), преобладающим типом осадков озер Заонежья по Md (средней линии частоты встречаемости) являются мелкоалевритовые илы. Кумулятивные кривые, имеющие равномерный ход, за исключением Нижнего Пигмозера, Падмозера, Верхнего Мягрозера и Валгомозера, отражают равные гидродинамические условия образования. Гистограммы этих осадков носят преимущественно многовершинный характер. Слабая сортировка материала указывает на то, что донные отложения находятся в условиях аккумуляции, где отлагается образующийся в озере материал и ничто не выносится.

Гистограммы донных отложений оз. Падмозера, обладающего продольной проточностью, отражают разные гидродинамические условия осадкообразования в районе устья р. Верхней Падмы, в центре озера и в районе истока р. Нижней Падмы (рис. 8.1).

Донные отложения заонежских озер имеют разную стратификацию (рис. 8.2). Слоистость отчетливо выражена в плотных типах осадков, содержащих глину и рудные образования. В илистых рыхлых осадках ясные границы

Таблица 8.1. Площади донных отложений озер Заонежья (Власова, 1965)

Озеро	Площадь, км ²	Песок и гравий		Ил с песком		Ил		Ил с рудой		Глинистый ил	
		км ²	%	км ²	%	км ²	%	км ²	%	км ²	%
Яндомозеро	31,7	7,0	20	0,3	1	22,6	73	–	–	1,8	6
Мягрозеро	5,1	1,4	26	1,0	21	2,7	53	–	–	–	–
Падмозеро	11,6	0,4	5	–	–	2,4	21	–	–	8,8	74
Валгомозеро	3,5	0,3	9	0,2	4	2,5	74	0,4	11	0,1	2
Космозеро	22	4,4	20	1,3	6	14,0	63	2,1	9	0,2	1
Ванчозеро	10,9	1,7	17	0,4	4	7,1	64	–	–	1,7	15
Ладмозеро	24,8	6,5	27	0,5	2	7,6	31	6,1	24	4,1	16
Путкозеро	24	3,1	12	0,1	1	12,4	52	5,5	23	2,9	11
Нижнее Пигмозеро	13,9	4,3	32	1,6	12	8,0	56	–	–	–	–
Верхнее Пигмозеро	10,8	–	–	2,0	18	8,8	82	–	–	–	–

Примечание. В Космозере встречается глина с рудой, в Путкозере – глина с гравием, песком и рудой.

Таблица 8.2. Механический состав донных отложений зон накопления озера Заонежья, %

Озеро	Глубина залегания	Песок	Алеврит	Пелит	Глина
Яндомозеро	4,5	27	42	17	14
Мягрозеро	7,6	44	35	0	21
Падмозеро	15	1	51	32	16
Валгомозеро	16	40	37	14	9
Космозеро	17,5	0	33	39	28
Ванчозеро	18	14	46	23	16
Ладмозеро	36	17	40	22	22
Путкозеро	38	8	61	19	12
Падмозеро	3,5	1	51	32	16

слоев прослеживались только для оз. Падмозеро. Наибольшая мощность ила отмечена в понижениях дна озера Турастомозеро (>1 м), Нижнее Пигмозеро (81 см), Космозеро (66 см), Кереецкое (>1 м), Мягрозеро (>1 м). В нижних слоях грунтовых монолитов озера Путкозеро, Ладмозеро, Космозеро и Вангозеро содержится глина.

По характеру седиментационных процессов исследованные водоемы можно разделить на три группы: накопители органического вещества, озера с окислительными условиями седиментации и незначительным влиянием на процессы осадконакопления водосборного бассейна, а также озера, аккумулирующие неорганические и органические взвеси автохтонного и терригенного происхождения. Химический состав донных отложений водоемов с глубоко врезанными котловинами (Путкозеро, Космозеро, Ладмозеро), формирующийся в обстановке низкого органонакопления и окислительной среды, в большей степени определяется составом материнской породы. Неглубокие озера ледникового происхождения (Мягрозеро, Яндомозеро, Кереецкое), скорее, относятся к типу озер-накопителей органического веще-

ства. Формирование и, следовательно, химический состав донных отложений таких озер зависят от климатических факторов. Для озер с высоким показателем водообмена (Вангозеро, Падмозеро) нельзя не учитывать вклад приточных вод при образовании донных осадков.

Содержание органических веществ (ОВ) в донных отложениях исследованных озер колеблется в широких пределах ($C_{орг.}$ от 3,7 до 22% в. с. н.). Наибольшее количество ОВ содержится в илах озера Мягрозеро, Кереецкое и Турастомозеро, самое низкое – отмечено в оз. Путкозеро. Содержание растительных пигментов и продуктов их разложения в осадках эвтрофных водоемов в среднем в 10 раз выше, чем олиготрофных (табл. 8.3). Источники поступления ОВ в донные отложения различны. Например, для оз. Ладмозеро – это болотный гумус, для озера Яндомозеро и Мягрозеро – высшая водная растительность и фитопланктон, а для оз. Падмозеро наблюдается сезонная зависимость (в течение лета это продукция фитопланктона, по окончании вегетационного периода – высшая водная растительность, в осенний и весенний периоды – болотный

Таблица 8.3. Растительные пигменты в донных отложениях озера Заонежья, мкг/г в. с. н

Водоем	Chl a	Chl b	Chl c	Сумма хлорофиллов	Феофитин
Путкозеро	38,6	2,5	8,8	49,9	66
Валгомозеро	171,8	35,1	28,1	235	298
Турастомозеро	808,2	300,5	26,3	1135,2	990
Вангозеро	243,6	43,6	78,6	365,8	321,4
Мягрозеро	438,9	57,3	126,8	623	642,6
Космозеро	131,4	13,3	27,4	172,1	185,9
Ладмозеро	75,8	7,4	16,5	99,7	130,6
Падмозеро	505,8	9,6	27,3	542,7	257,9
Яндомозеро	225,8	48	34,7	308,5	355,1
Кереецкое	284,4	55,2	27,2	366,8	342,5

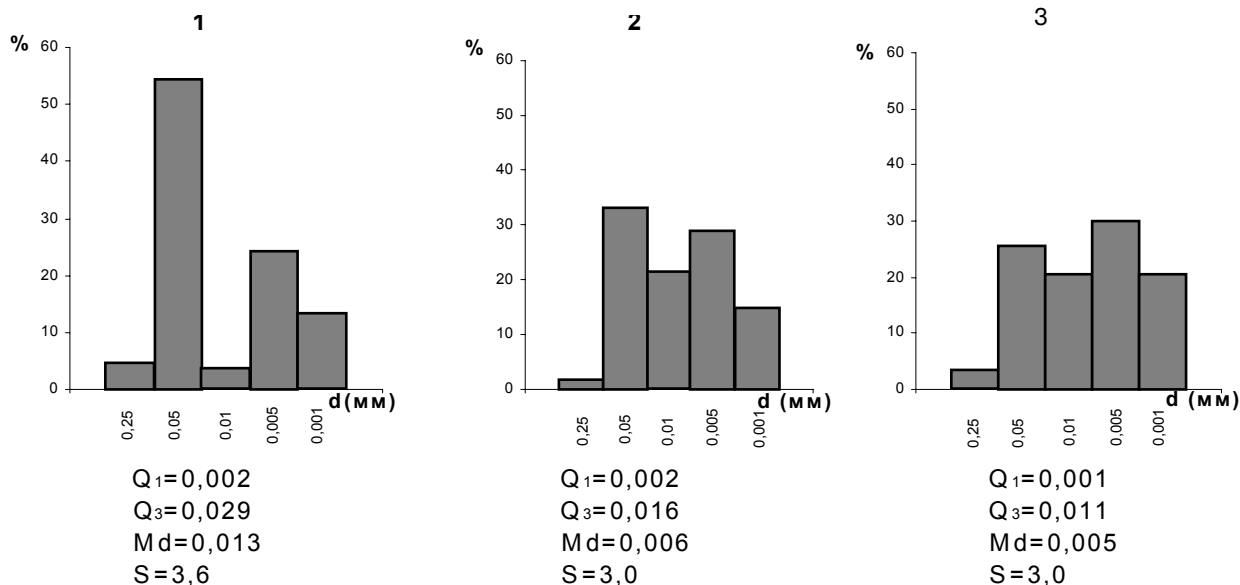


Рис. 8.1. Гистограммы донных отложений оз. Падмозеро: 1 – устье р. Верхней Падмы; 2 – центр; 3 – исток р. Нижней Падмы

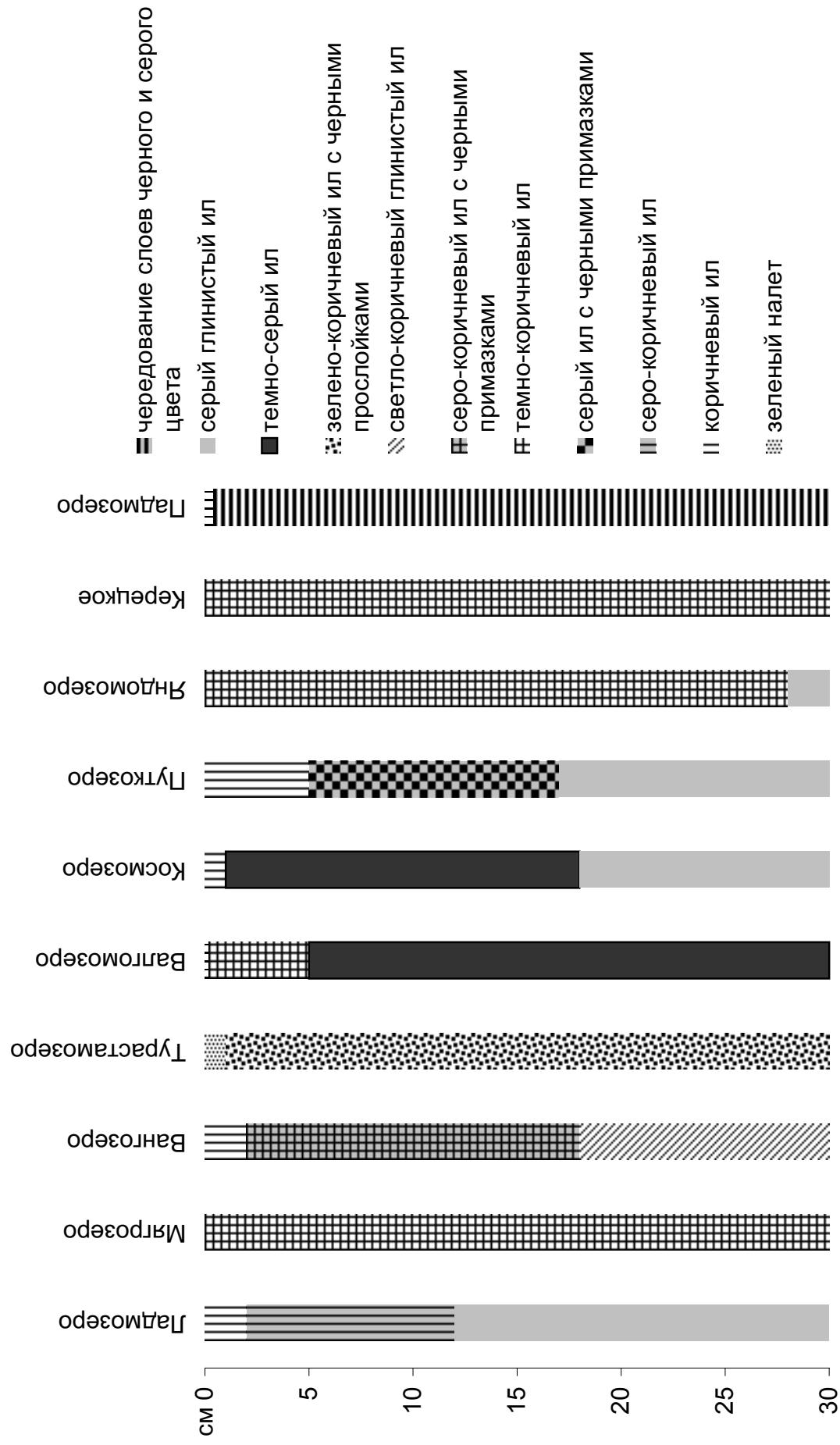


Рис. 8.2. Стратификация донных отложений озер Заонежского полуострова

гумус). Содержание азота тесно связано с содержанием ОВ. По мере увеличения ОВ концентрации азота возрастают: максимальная концентрация обнаружена в оз. Мягрозере (2,2%), минимальная – в оз. Путкозеро (0,3%). Содержание фосфора общего колеблется от 0,12% (Яндомозеро) до 0,26% (Вангозеро). В водоемах, где наблюдали недостаточное насыщение кислородом вод придонного горизонта (Вангозеро, Турастамозеро, Падмозеро, Путкозеро, Ладмозеро, Космозеро), более 70% от $P_{\text{общ.}}$ находится в легкоподвижной форме. В донных отложениях исследованных озер довольно высокие величины содержания железа: от 1,9% в Турастамозере до 5,2% в Вангозере. Железорудные образования в виде гороховидной или рыхлой бесформенной руды обнаружены в семи озерах, исключение составляют Мягрозеро и Турастамозеро. В глубоководных тектонических озерах (Ладмозеро, Путкозеро, Космозеро) рудные образования занимают 9–24% площади дна и тяготеют к глубинной зоне. Основным источником железа являются коренные породы, его накопление в донных осадках осуществляется путем осаждения из водной массы. Содержание микроэлементов в илистых донных отложениях озер Заонежья находится в пределах кларковых значений и не

превышает их концентраций в почвах водосборных территорий (табл. 8.4).

Распределение химических компонентов по глубине иловой колонки изучалось на примере керна донных отложений (0–20 см) оз. Падмозеро, проточного, мелководного, эвтрофного водоема. Толща осадка, отобранного на глубине 15 м, ясно стратифицирована. Неравномерный характер осадконакопления проявляется в чередовании слоев разной мощности: светло-серо-коричневого цвета, осевших в период открытой воды, с тонкими черными прослойками, выпавшими зимой в период кислородного дефицита, что позволяет оценить среднюю скорость осадконакопления верхнего слоя

Таблица 8.4. Содержание микроэлементов в донных отложениях озер Заонежья, мкг/г в. с. н.

Водоем	Cd	Ni	Pb	Co	Zn	Cu
Вангозеро	0,61	44	28,6	14,6	127	63,6
Космозеро	1,14	20,3	65,1	7,55	137	41,9
Путкозеро	0,52	15,5	35,7	4,19	66,5	38,5
Валгомозеро	0,2	30,6	11,6	13,8	75,2	38
Ладмозеро	0,5	42,7	29,5	12,9	126	61,2
Яндомозеро	0,41	38,8	37,1	14,7	143	51,1
Турастамозеро	0,71	27,4	44,1	13,8	126	45,5
Падмозеро	0,28	25,2	45,6	12,4	104	38,1
Мягрозеро	0,19	41	16,3	16,1	136	45,5

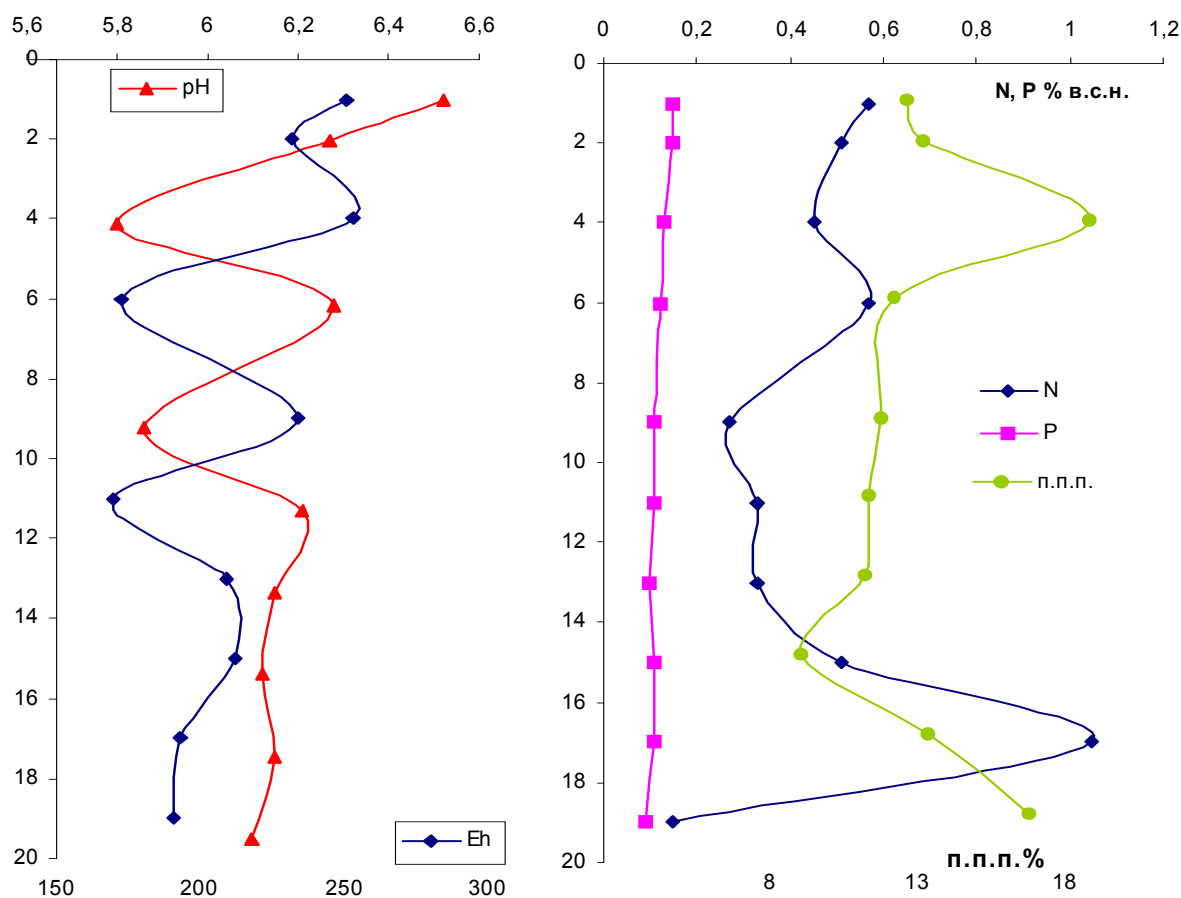


Рис. 8.3. Изменение pH и Eh, потери при прокаливании, $N_{\text{общ.}}$, $P_{\text{общ.}}$ в колонке донных отложений оз. Падмозеро

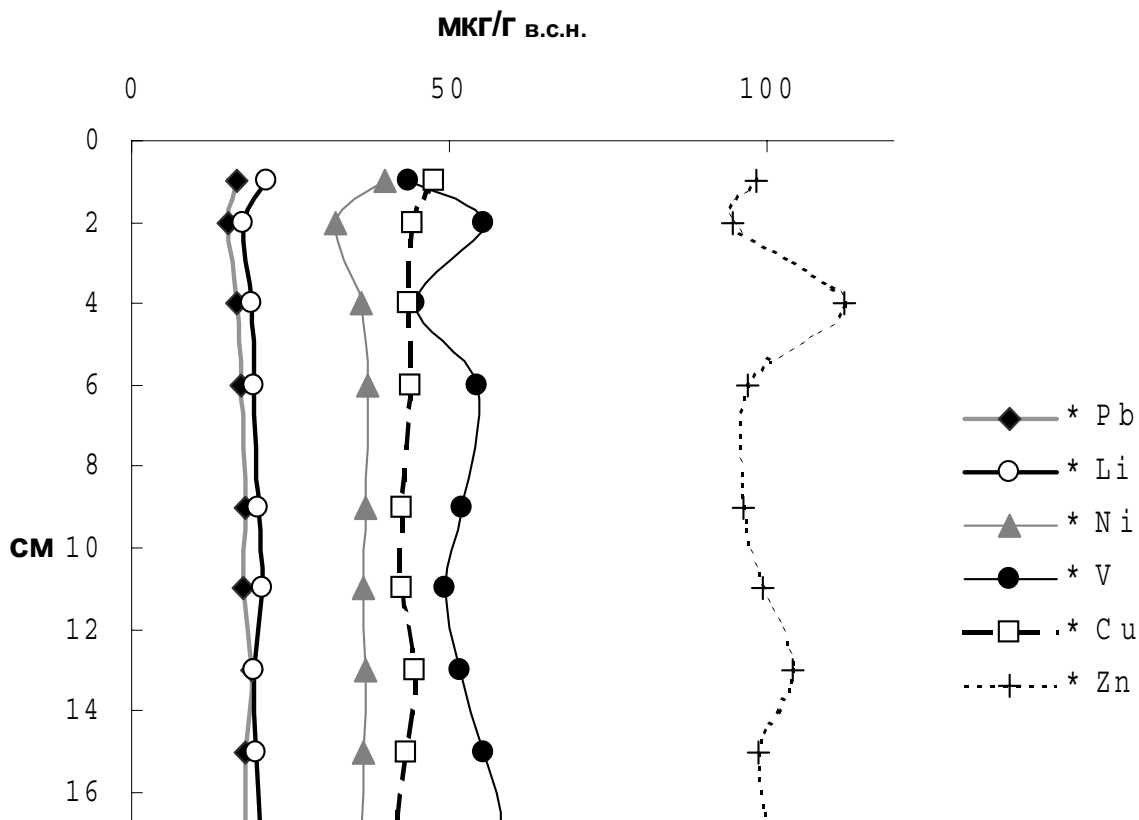
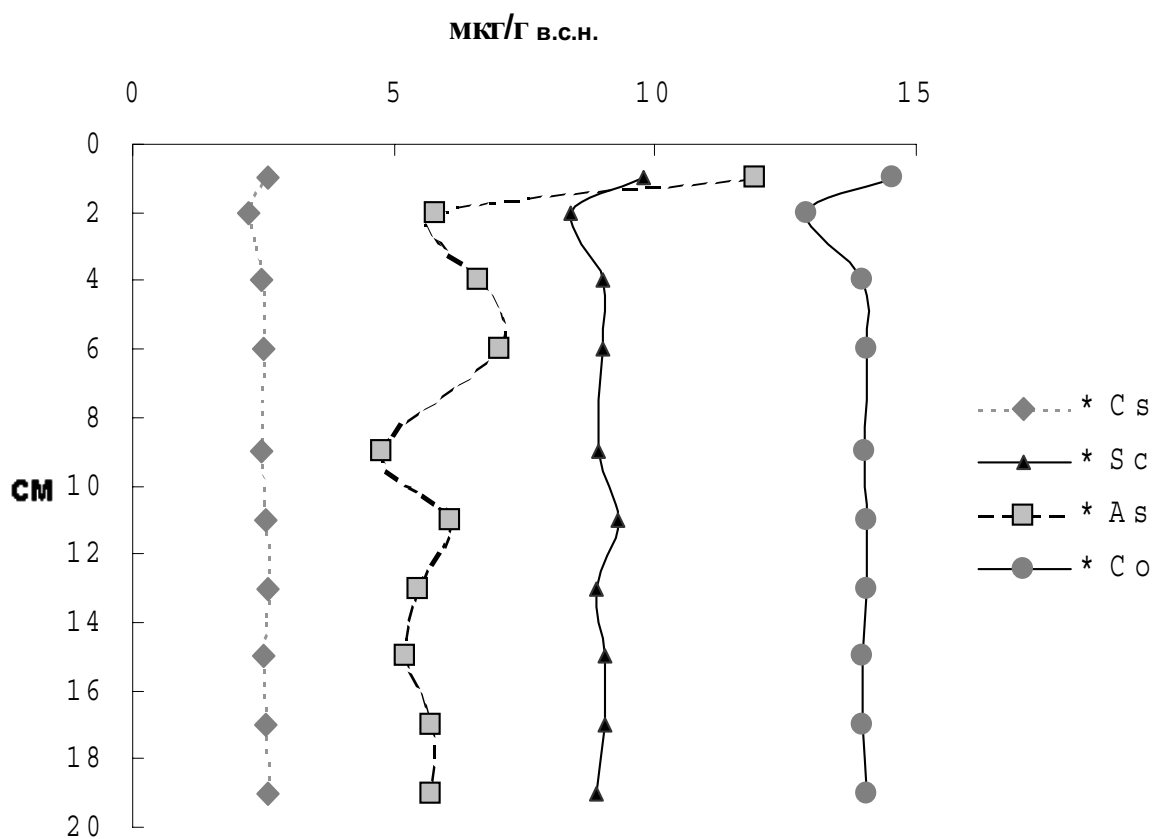


Рис. 8.4. Распределение микроэлементов в колонке донных отложений оз. Падмозеро

донных отложений (около 1 см в год). Медленно протекающие диагенетические преобразования осевшего на дно материала являются причиной того, что сезонные изменения окислительных и восстановительных условий в озере отражаются на вертикальных профилях ппп, биогенных элементов, рН и Eh в верхнем 10-сантиметровом слое донных отложений (рис. 8.3). Максимальным значениям Eh, как правило, соответствуют минимальные значения рН, поскольку окисление ОВ в аэробных условиях сопровождается выделением CO_2 и понижением рН ($[\text{OV}] + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_3^- + \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$). Минимальным значениям Eh соответствуют наиболее высокие значения рН, так как анаэробные процессы разложения органического вещества сопровождаются повышением рН. В толще донных отложений окислительно-восстановительные процессы, происходящие за счет ОВ и жизнедеятельности микроорганизмов, постепенно затухают, профили Eh и рН постепенно выравниваются. Распределение компонентов по глубине отложений здесь определяется перемещением химических элементов в массе осадка вследствие изменения физико-химических условий и процессами литификации в результате дегидратации, старения коллоидов, перехода менее устойчивых минералов в более устойчивые модификации, удаления легкорастворимых соединений, перекристаллизации, уплотнения, образования новых минералов, цементации и образования конкреций.

Концентрационные профили для большинства металлов (рис. 8.4) демонстрируют более высокие их содержания в поверхностном слое (например, Mn в 3 раза) и локальные подповерхностные минимумы на глубине 2 см, что, по-видимому, указывает на поступление этих элементов в воду вследствие разложения органического вещества. Исключение составляет ванадий, концентрации которого на поверхности донных отложений несколько ниже, чем в толще осадка. Анализ содержания V в донных отложениях, залегающих в районе устья р. Падмы, показал, что его концентрация в слое 0–5 см в 1,5 раза ниже, чем в слое 5–13 см ($V = 37$ и 54 мкг/г). Причинами этого могут быть как особенности миграции – накопление менее подвижных форм с органическим веществом в восстановительной среде осадка, так и более высокое поступление элемента в донные отложения в предыдущие годы. Трансформация органических веществ в донных отложениях сопровождается перераспределением металлов

по глубине колонки и образованием слоев с более высокими концентрациями для следующих элементов: Pd – на глубине 6 см его содержание в 4 раза превышает содержание в прилежащих слоях; Ta и W – на глубине 13 см, соответственно, в 2 и 1,5 раза выше; Ag, Bi, Br – на глубине 20 см.

Заключение

Уникальность и неповторимость озер Заонежья определяет различное сочетание геологических, ландшафтных и физико-химических обстановок, в результате чего на небольшой по площади территории Заонежского полуострова встречаются водоемы с элементами всех типов озерного накопления (аккумуляторы наносов, концентраторы минеральных веществ и накопители органического вещества). Илы, однородные по цвету и структуре, – наиболее распространенный вид донных отложений. Песчано-гравийный тип представлен в литорали, встречаются глины, рудные образования в смеси с илом тяготеют к глубинной зоне. Донные отложения разнообразны и по химическому составу. Содержание органических веществ колеблется в широких пределах (от 47% в. с. н. – оз. Мягрозера до 9 % в. с. н. – оз. Путкозеро). Содержание азота по мере увеличения ОВ возрастает (от 0,3 до 2,2% в. с. н.). Содержание фосфора колеблется от 0,1% (оз. Кереецкое) до 0,26% (оз. Ванчозера). В донных отложениях исследованных озер довольно высоки величины содержания железа: от 1,8% в оз. Кереецком до 5,19% в Ванчозере. Концентрации марганца изменяются от 0,2 до 0,5% в. с. н. Содержание микроэлементов соответствует фоновым значениям.

Литература

- Васильева Е. П., 1965. Химический состав донных отложений озер Заонежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 104–109.
- Васильева Е. П., Поляков Ю. К., 1992. Каталог озер Карелии. Донные отложения. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 154 с.
- Власова Т. С., 1965. Донные отложения озер Заонежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 93–103.
- Фрейндлинг В. А., Поляков Ю. К., 1965. Морфология и гидрология озер Заонежья // Там же. С. 61–78.
- Håkanson L., Jansson M., 1983. Principles of lake sedimentology. Berlin. 316 p.

СОДЕРЖАНИЕ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВБЛИЗИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАДМА

А. И. МАКСИМОВ

Институт биологии Карельского научного центра РАН

Приводится содержание 6 макро- (K, Na, Ca, Mg, Fe, Al) и 21 микроэлемента (Be, Ba, B, Pb, Mn, Ti, Cr, Ni, Mo, V, Cu, Zn, Co, Zr, Hg, As, Se, Sr, Cd, U, W) по всему профилю торфяной залежи (от дна к поверхности) на трех болотах, расположенных на различном расстоянии от месторождения Падма. Средняя концентрация макро- и микроэлементов оказалась несколько выше, чем на ряде болот, расположенных в других районах Карелии. Это связано с залеганием исследованных болотных массивов в районе с богатыми шунгитовыми почвами. Отмечается, что уран содержится во всех слоях торфяных залежей изученных болот независимо от их минерального питания (грунтового или атмосферного).

A. I. MAKSIMOV. MAKROELEMENT AND MICROELEMENT CONTENT IN PEAT DEPOSITS OF MIRES NEAR PADMA

Six macroelements (K, Na, Ca, Mg, Fe, Al) and 21 microelements (Be, Ba, B, Pb, Mn, Ti, Cr, Ni, Mo, V, Cu, Zn, Co, Zr, Hg, As, Se, Sr, Cd, U, W) are analyzed for three mires for the studied area. The concentration of macro elements and microelements were higher then average for mires of Karelia. It is caused by formation processes the studied mires in a rich soil region. Uranium have been found in pet deposits both eutrophic and ombrotrophic mires.

Ключевые слова: макроэлементы, микроэлементы, торф, торфяная залежь, болотные экосистемы, Карелия.

Введение. Геохимические аспекты функционирования болотных экосистем

Согласно радиоуглеродным датировкам болота Карелии начали зарождаться 9,0–9,5 тыс. лет назад. Современные стадии болотообразовательного процесса представлены большим разнообразием типов от олиготрофного и дистрофного до эвтрофного, а сами болотные экосистемы являются практически замкнутыми. В круговороте минеральных элементов как на самих болотах, так и при их взаимодействии с другими экосистемами принимает участие деятельный горизонт (Лопатин, 1949; Иванов, 1953), включающий живые растения и небольшой слой торфа под ними. Его мощность на низинных (евтрофных) болотах составляет 10–30 см, а на верховых (омбротрофных) – примерно 40–50 см. Остальная и преобладающая

часть торфяной залежи в геохимическом обмене, по-видимому, является инертной, хотя незначительные изменения минерального состава торфа происходят. Так, вышекларковое содержание ряда элементов в торфах по сравнению с минеральными почвами обычно связано со вторичными изменениями минерального состава в результате нарушения процесса развития болот (осушения, засоления и т. д.).

Процесс аккумуляции и миграции минеральных элементов на болоте в системе растение – торф – болотная вода в настоящее время изучен крайне недостаточно (Хмелев, 1985). Благодаря незамкнутому круговороту веществ большинство химических элементов, поступающих на болота, аккумулируются в торфе и таким образом на века исключаются из обмена веществ тех ландшафтов, в пределах которых они находятся. Некоторые элементы, в частности Mn,

Zn, Cu, B и др. (Тойка и др., 1973), в кислой среде болот становятся, наоборот, более подвижными и при промывном режиме в значительных количествах выносятся за их пределы. Содержание подвижных форм элементов, которые выносятся в водные экосистемы, коррелирует с их валовым содержанием в торфе (Тойка и др., 1973). Придонные слои торфяной залежи, возникшие на начальных этапах развития болот, как установлено нами (Максимов и др., 1991), обогащены как макро-, так и микроэлементами. Поэтому можно предположить, что в далеком историческом прошлом масса выносимых в водоемы минеральных элементов была на несколько порядков больше, чем в настоящее время. В этот период растительность была другой, а сами болота как экосистемы были более открыты. В целом в течение 7,0–9,5-тысячелетнего болотообразовательного процесса в водоемы поступило примерно 280 т гумуса с 1 га болот (Козловская и др., 1978) и большое количество минеральных элементов (по нашим расчетам, около 140 т с га). Главными источниками поступления минеральных элементов на современные болота являются: 1) продукты минерализации опада растений самих болот, 2) пыль и атмосферные осадки, 3) выклинивающиеся грунтовые воды и реже 4) воды поверхностного стока с вышерасположенных ландшафтов во время весеннего снеготаяния или продолжительных ливневых дождей. В зависимости от типа болот доли этих источников различаются.

Анализ публикаций по минеральному составу торфов Карелии показал, что до середины 1980-х годов детальных исследований по этой проблеме не проводилось (Максимов и др., 1991). В работах, опубликованных в этот период (Бухман, 1959, 1960; Волкова, Кузнецов, 1977; Елина и др., 1984; Максимов, 1984, 1988 и др.), обычно приводится агрохимическая характеристика или содержание некоторых макроэлементов (Ca, Mg, K, P) в наиболее распространенных видах торфа или в верхнем метровом слое торфяных залежей. Это не дает полного представления о распространении минеральных элементов по профилю торфяника, а также о их геохимических превращениях. Работ регионального плана по оценке содержания микроэлементов в торфяных залежах разных генетических типов проведено также мало (Крештапова, 1974; Кузнецов и др., 1983; Кузнецов, Тойка, 1985; Максимов и др., 1991; Kuznetsov, Maksimov, 1995).

В связи с изложенным, исследования по выявлению уровней содержания и распределения макро- и микроэлементов в торфяных залежах различного типа, сформировавшихся в разнообразных геоморфологических и геологических условиях в процессе развития болотных экосистем, являются весьма актуальными.

Начиная с 1986 г. нами проанализировано содержание 9 макро- (K, Na, Ca, Mg, Al, Si, P, S,

Fe) и 16 микроэлементов (Ba, Mn, Ti, Sr, Zn, Zr, Pb, B, V, Cr, Ni, Cu, Co, Mo, Sn, Be) в торфяных залежах болотных массивов различного типа, расположенных в разных районах региона (Максимов и др., 1991; Кузнецов и др., 1998; Максимов, 1999).

На всех изученных болотных массивах выявлена следующая закономерность в распределении макро- и микроэлементов: по профилю торфяной залежи от ее дна к поверхности наблюдается прогрессирующее обеднение торфов минеральными элементами. Концентрация элементов в торфах значительно ниже (в верхних слоях нередко в 100 раз и более), чем в минеральных почвах.

В зависимости от типа болот и подстилающих пород содержание макро- и микроэлементов в торфяных залежах сильно варьирует. Так, средняя концентрация элементов в торфах аа-па болота Саванка в северной Карелии примерно равна их концентрации на аа-па болоте Неназванное в южной Карелии (Максимов и др., 1991; Кузнецов и др., 1998) и существенно ниже, чем на евтрофно-мезотрофном грядово-мочажинном (Замощье) и евтрофном травяно-гипновом (Боярщина) болотах Заонежского полуострова (Максимов, 1999). Последние два болотных массива расположены в районе с богатыми протерозойскими коренными породами и шунгитовыми почвами, что и повлияло на накопление в их торфах значительно большего количества всех минеральных элементов. Особенно велика здесь концентрация меди. Полученные нами данные по содержанию микроэлементов в торфяной залежи болота Замощье и особенно его верхних слоев можно использовать как фоновые при оценке экологической обстановки в районе месторождения Падма.

Таким образом, геохимические аспекты функционирования болотных экосистем характеризуются: 1) рассеянием большинства минеральных элементов даже в условиях питания болот богатыми грунтовыми водами, 2) накоплением этих же элементов в огромных количествах в многометровых толщах торфяных залежей и исключением их из круговорота веществ. В этом смысле болотные экосистемы выступают своеобразным геохимическим барьером на пути движения минеральных элементов к водоприемникам (Перельман, 1968, 1975).

Материал и методы

Во время полевых исследований в августе 2001 г. в течение 10 дней нами изучены 8 болот в окрестностях месторождения Падма. На них сделаны геоботанические описания растительности, изучено строение торфяных залежей. В наиболее глубоких и интересных по генезису участках болот отобраны образцы торфа на всю глубину торфяной залежи с целью проанализировать накопление тяжелых

металлов в естественной обстановке на различном удалении от месторождения (рис. 9.1). Всего для определения тяжелых металлов отобрано 65 образцов торфа и подстилающих болотные массивы грунтов. Концентрацию элементов определяли методом масс-спектрометрического анализа с ионизацией в индуктивно-связанной плазме (ICP-MS).

Торфа довольно значительно отличались по объемному весу – от 0,02 до 0,4 г/см³, поэтому содержание минеральных элементов рассчитывали на единицу объема (1 л), а не на единицу массы, учитывая рекомендации В. Д. Лопатина (1974), В. К. Бахнова (1986). Пересчет аналитических данных на единицу объема особенно необходим при сопоставлении содержания зольных элементов в торфах и минеральных почвах. Для глинистых сапропелей и подстилающих грунтов (глина, песок) был принят объемный вес 1 г/см³.

Результаты и дискуссия

Болото Ганьковское расположено за пределами месторождения (рис. 9.1: 3) и относится к верховому (омбротрофному) типу. В 70-е годы прошлого века болото было частично осушено, но на нем сохранилась естественная растительность. Торфяная залежь болота до глубины 2 м сложена верховыми торфами, т. е. минеральное питание данного массива уже длительное время (2,0–2,5 тыс. лет) осуществляется преимущественно за счет атмосферных осадков и пыли, выпадающих на его поверхность. Следовательно, содержание минеральных элементов в торфяной залежи этого массива можно также рассматривать как фоновое.

В распределении макроэлементов по профилю торфяной залежи данного болотного массива (табл. 9.1, рис. 9.2) в основном наблюдается прогрессирующее обеднение минеральными элементами по мере накопления

Таблица 9.1. Содержание макроэлементов в торфах и подстилающем грунте верхового (омбротрофного) болотного массива Ганьковское (скв. 3), мг/л

Глубина, м	Вид торфа	Степень разложения, %	pH (водн.)	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
0,25	Сфагновый верховой	15	3,6	29,52	8,97	89,8	39,23	11,21	74,35
0,5	Пушицевый верховой	35	3,9	13,04	8,64	121,75	46,24	126,4	141,65
1	То же	35	3,8	6,71	5,64	137,77	49,33	128,9	134,59
1,25	Сосново-пушицевый верховой	40	3,9	5,09	9,52	168,16	58,8	164,19	141,63
1,5	Сфагново-пушицевый верховой	35	4,1	6,23	5,97	206,57	59,86	206,7	100
2	То же	35	3,9	7,83	9,77	285,3	59,04	302,84	97,18
2,5	Сфагновый переходный	25	4,5	7,22	5,34	409,41	70,39	459,47	95,32
2,75	Сфагновый низинный	20	4,3	12,91	12,39	427,47	89,49	659,28	103,59
3	Осоково-гипновый низинный	25	4,3	17,75	18,61	510,71	85,39	828,08	50,62
3,25	Глина		5,4	12 559	15 347	9433	16 010	30 572	18 900

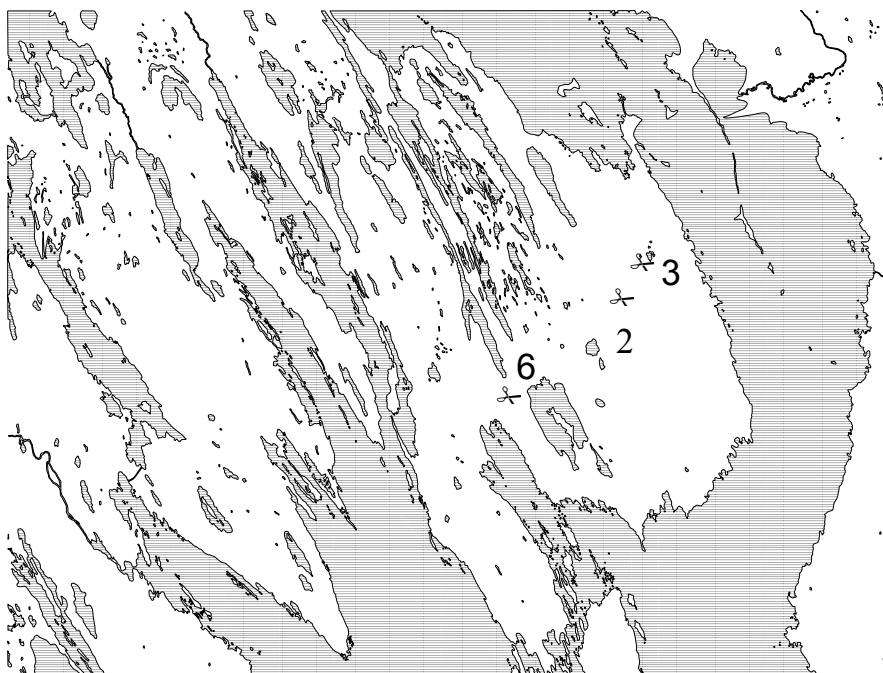


Рис. 9.1. Места отбора образцов торфа на болотах:

2 – Узкий Мох, 3 – Ганьковское, 6 – Космозерское (рисунок выполнен П. Н. Токаревым)

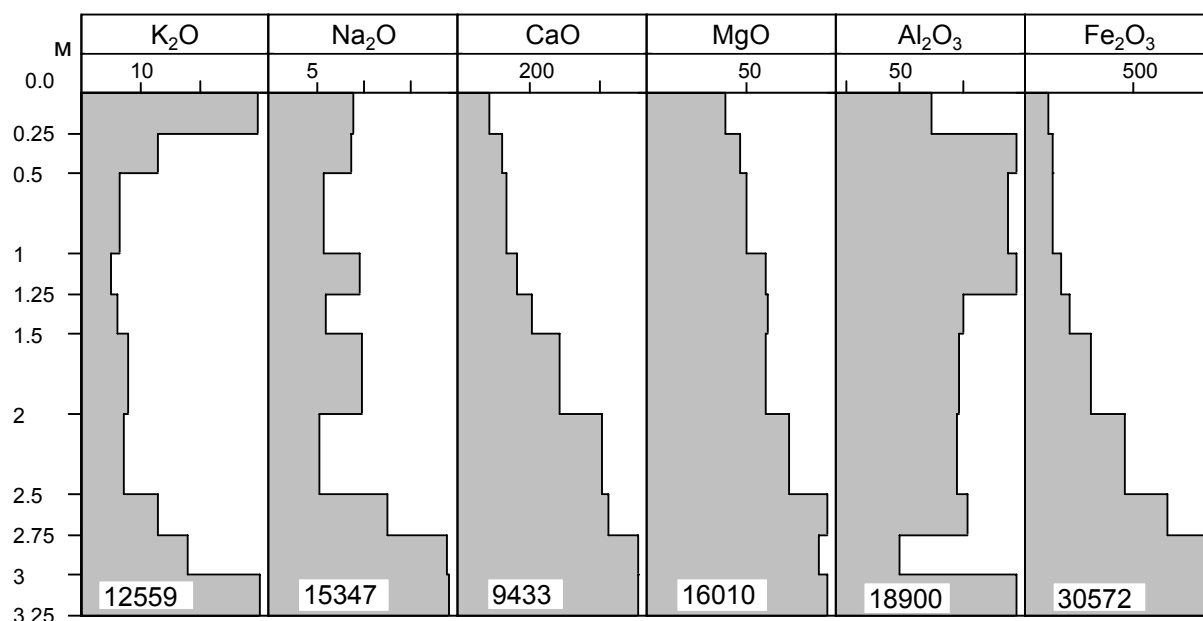


Рис. 9.2. Распределение некоторых макроэлементов по профилю (глубине) верховой торфяной залежи болота Ганьковское (скв. 3), мг/л

торфа. Только в деятельном горизонте (0,5 м) отмечено значительное увеличение содержания калия и алюминия. Калий является биогенным элементом, поэтому его высокую концентрацию в верхнем слое торфяной залежи можно объяснить его аккумуляцией растениями. Высокое содержание алюминия в поверхностных слоях торфяной залежи обусловлено поступлением его с пылью, так как в окрестностях болота много распаханых земель.

Содержание тяжелых металлов в торфяной залежи болотного массива довольно низкое, что обусловлено его атмосферным питанием (табл. 9.2, рис. 9.3). Прогрессирующее обеднение торфов минеральными элементами наблюдается только на начальных этапах развития массива, а затем с глубины 2,5 м для большинства элементов не прослеживается. Пики концентраций тяжелых металлов в основном приурочены к слоям торфа с высокой степенью разложения, для которых характерна наименьшая скорость фильтрации воды. Заметное увеличение содержания большинства тяжелых металлов в слое 0,25–0,50 м торфяной залежи, скорее всего, связано с резким падением уровня грунтовых вод после осушения болотного массива. Слой пушицевого торфа с высокой степенью разложения (35%), выступая в качестве фильтра, является барьером на пути движения минеральных элементов и способствует пассивному их накоплению в этом горизонте (табл. 9.3, рис. 9.3). Увеличение содержания свинца, цинка и кадмия в верхних горизонтах торфяной залежи связано с усиливающимся антропогенным воздействием на природу Заонежского полуострова. Постоянное присутствие урана во всех слоях торфяной залежи болотного массива, расположенного на значи-

тельном удалении от месторождения, свидетельствует о том, что воздействие месторождения распространяется на довольно обширную территорию.

Рассмотрим особенности распределения минеральных элементов в торфяной залежи болота Узкий Мох, расположенного непосредственно над месторождением (рис. 9.1: 2). Развитие исследованного участка болота с момента зарождения массива по настоящее время проходило в условиях богатого грунтового питания, что подтверждается высоким содержанием в торфах кальция и магния и низинным строением торфяной залежи (табл. 9.3, рис. 9.4).

В содержании микроэлементов в торфяной залежи выявляется два четких пика: в горизонте 0,5 м и придонном (табл. 9.4, рис. 9.5). В первом случае увеличение содержания тяжелых металлов является результатом проведения осушительной мелиорации, выполнявшейся примерно в те же сроки, что и на болоте Ганьковское. После осушения произошло снижение уровня грунтовых вод и как следствие этого – накопление практически всех минеральных элементов в горизонте 0,5 м, так как он сложен древесно-тростниковым торфом со степенью разложения 30–40%. Скорость фильтрации в этом горизонте значительно меньше, чем в лежащем выше сфагновом торфе. На контакте сфагнового и древесно-тростникового торфов возник барьер для движения воды, что, вероятно, привело к осаждению и накоплению большинства минеральных элементов в этом горизонте.

Среднее содержание урана в торфах данного болота в 8 раз превышало его концентрацию в торфяной залежи болота Ганьковское.

Таблица 9.2. Содержание микроэлементов в торфах (0,25–3,0 м) и подстилающем грунте (3,25 м) верхового (омбротрофного) болотного массива Ганьковское (скв. 3), в числителе – мг/л, в знаменателе – мг/кг

Глубина, м	Be	Ba	B	Pb	Mn	Ti	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Zn	Co	Zr	Hg	As	Se	Sr	Cd	U	W
0,25	0,007	0,8621	<0,007	0,6955	0,4769	2,5168	0,4117	0,1194	0,0124	<0,000	0,128	0,9472	0,0289	0,0482	<0,0007	<0,0014	0,0116	0,3826	0,0181	0,003	0,0029
				9,936	6,813		5,882	1,705		4	1,828	13,532	0,413						0,258		
0,5	0,0022	1,49	<0,0125	0,3959	3,3731	7,2579	0,8787	0,2095	0,0147	<0,000	0,3193	0,5133	0,0388	0,1306	<0,0012	<0,0025	0,0352	0,4516	0,0087	0,0131	0,0034
				3,18	27,093		7,058	1,683		6	2,565	4,123	0,312						0,07		
1	0,0019	1,3075	<0,0125	0,1148	0,5937	5,7282	0,932	0,2089	0,0068	<0,000	0,3201	0,3548	0,0357	0,1077	<0,0012	<0,0025	0,0078	0,4343	0,0123	0,0073	0,0015
				0,922	4,769		7,486	1,678		6	2,571	2,85	0,287						0,099		
1,25	0,0012	1,326	<0,0138	0,048	0,9614	5,8958	0,9002	0,224	0,0072	<0,000	0,1962	0,3019	0,0352	0,1007	<0,0014	<0,0028	0,0418	0,5047	0,011	0,0095	0,0021
				0,348	6,967		6,523	1,623		7	1,422	2,188	0,255						0,08		
1,5	0,0011	1,6436	<0,0125	0,0314	1,0695	4,2036	0,9054	0,1609	0,0082	<0,000	0,1306	0,2957	0,0351	0,0706	<0,0012	<0,0025	0,0462	0,5603	0,0065	0,008	0,0025
				0,252	8,59		7,272	1,292		6	1,049	2,375	1,282						0,052		
2	0,0014	1,9483	<0,0125	0,0288	2,4195	3,7868	0,719	0,0649	0,0167	<0,000	0,1663	0,1204	0,0283	0,0799	<0,0012	<0,0025	0,0316	0,6501	0,021	0,0059	0,0015
				0,231	19,434		5,775	0,521		6	1,336	0,967	0,227						0,169		
2,5	0,0015	3,0296	<0,0099	0,0272	3,4784	4,2159	0,1685	0,0567	0,0076	<0,000	0,2266	0,2153	0,0238	0,0954	<0,001	<0,002	0,0337	0,9378	0,0294	0,0049	0,0015
				0,276	35,314		1,711	0,576		5	2,3	2,186	0,242						0,289		
2,75	0,0015	4,2012	<0,0104	0,0367	4,8849	3,3817	0,2891	0,0311	0,0096	<0,000	0,0724	0,1181	0,0137	0,0771	<0,001	<0,0021	0,0324	1,1133	0,0128	0,0062	0,0007
				0,353	46,97		2,78	0,299		5	0,696	1,136	0,132						0,123		
3	0,0044	5,1434	<0,0116	0,0421	5,459	4,5397	0,1737	0,1398	0,0545	<0,000	0,2881	0,1337	0,0256	0,1318	<0,0012	<0,0023	0,0543	1,2392	0,0176	0,043	0,0017
				0,363	47,06		1,497	2,484		6	2,484	1,153	0,221						0,152		
3,25	0,683	419,44	<0,1	13,144	290,83	2586	52,079	60,607	0,861	70,861	70,719	132,83	16,454	63,724	<0,01	8,51	0,328	108,9	0,593	2,296	0,416

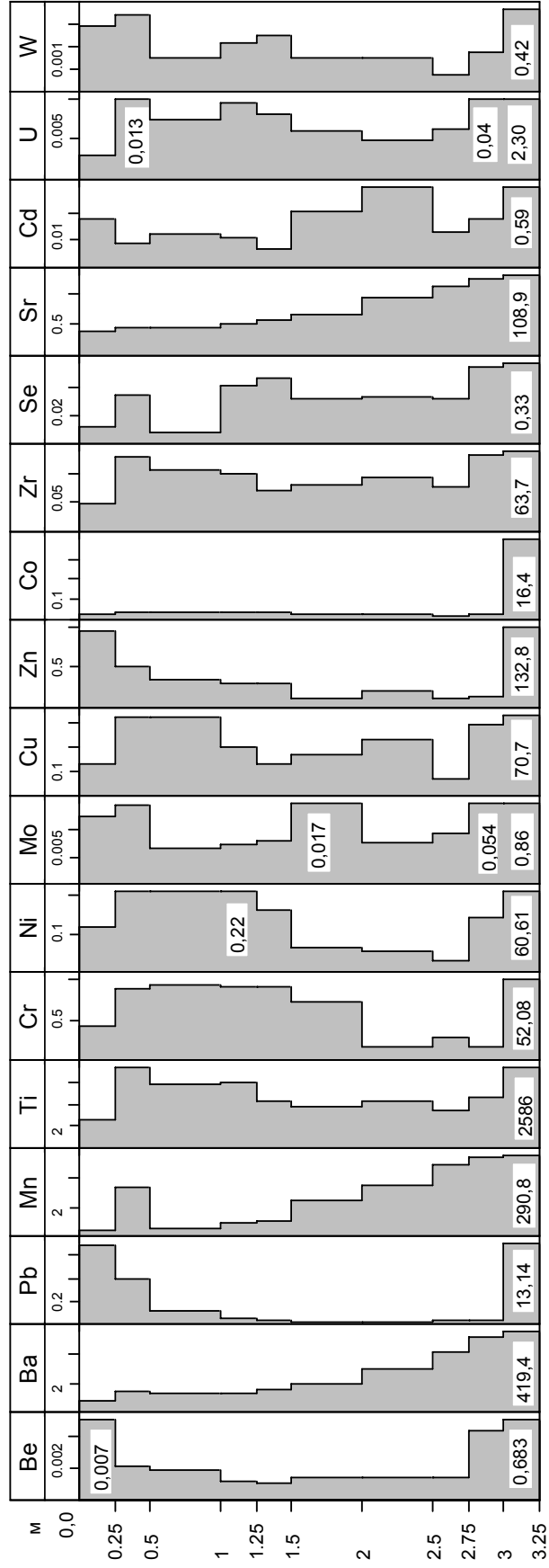


Рис. 9.3. Распределение микроэлементов по профилю (глубине) торфяной залежи верхового (омбротрофного) болотного массива Ганьковское (скв. 3), мг/л

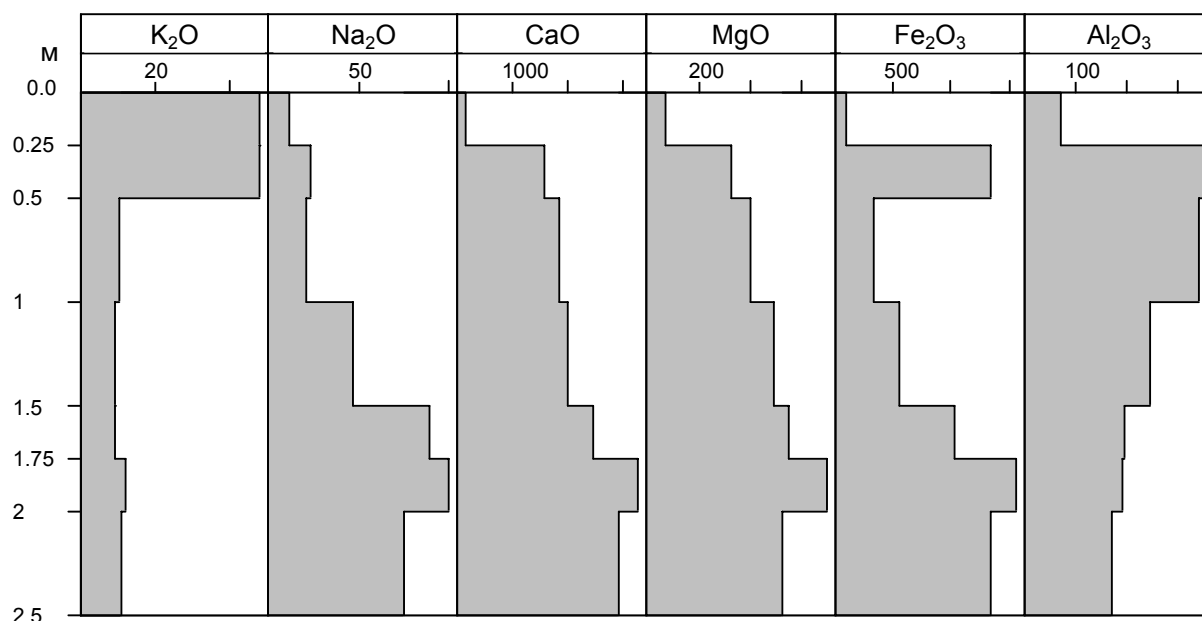


Рис. 9.4. Распределение некоторых макроэлементов по профилю (глубине) низинной торфяной залежи болота Узкий Мох (скв. 2), мг/л

Таблица 9.3. Содержание макроэлементов в торфах низинного (евтрофного) болотного массива Узкий Мох (скв. 2), мг/л

Глубина, м	Вид торфа	Степень разложения, %	pH (водн.)	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
0,25	Сфагновый низинный	10	4,2	48,3	10,784	151,54	73,085	95,41	70,46
0,5	Древесно-осоковый низинный	30	5,9	48,28	23,47	1575,48	330,01	1337,29	353,45
1	То же	30	5,9	10,67	20,19	1837,46	398,56	329,66	340,38
1,5	Древесный низинный	35	6,2	9,23	46,24	2002,09	487,45	541,14	246,87
1,75	То же	35	6,2	9,57	88,32	2472,73	547,57	1020,42	197,66
2	Древесно-тростниковый низинный	40	6,0	12,13	99,78	3289,88	696,32	1559,34	191,04
2,5	То же	40	6,1	11,28	74,58	2924,34	519,66	1341,55	170,93

Болото Космозерское расположено в западной части Заонежского полуострова, сформировалось в празаливе оз. Космозеро (рис. 9.1: б) и находится в естественном состоянии. Его формирование происходило в условиях богатого напорного грунтового питания, которое продолжается и в настоящее время (табл. 9.5, рис. 9.6).

В распределении микроэлементов по профилю торфяной залежи наблюдается прогрессирующее обеднение от дна к поверхности, за исключением Pb, Mo, Zn, Co и Cd (табл. 9.6, рис. 9.7). Перечисленные тяжелые металлы накапливаются в поверхностном 0,25 м горизонте. Концентрация тяжелых металлов в торфяной залежи болота Космозерское значительно выше, чем болота Узкий Мох, особенно таких элементов, как Mn, Mo, V, Cu, Zn, Co и U. Вероятно, это связано с тем, что болото Космозерское лежит в наиболее глубокой депрессии, где происходит разгрузка глубинных грунтовых вод. По-видимому, болотные массивы подобного типа наряду с озерами являются конечным пунктом миграции всех элементов, включая и те, которые поступают на поверхность болота аэрогенным путем (Pb, Zn, Cd).

Анализ содержания тяжелых металлов в 0,25 м слое исследованных торфяных залежей и лесных подстилок Медвежьегорского района показал следующее. Концентрация тяжелых металлов в поверхностном слое верхового (омбротрофного) болота Ганьковское ниже по сравнению с лесной подстилкой, за исключением железа, свинца и цинка (табл. 9.7). Содержание большинства тяжелых металлов в верхнем 0,25 м слое двух низинных торфяных залежей в 1,4–15 (Fe) раз выше, чем в лесных подстилках (табл. 9.7).

Заключение

Верховые торфяные болота питаются в основном за счет аэрогенных источников и могут служить эталонами при мониторинге загрязнения среды тяжелыми металлами.

Минеральное питание низинных болот, обладающих в регионе, осуществляется за счет богатых делювиальных и грунтовых вод. Максимальная концентрация многих тяжелых металлов, особенно Cu, U и V, отмечена преимущественно в нижних слоях торфяной залежи, что свидетельствует о большом содержании их

Таблица 9.4. Содержание микроэлементов в торфах низинного (евтрофного) болотого массива Узкий Мох (скв. 2), в числителе – мг/л, в знаменателе – мг/кг

Глубина, м	Be	Ba	B	Pb	Mn	Ti	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Zn	Co	Zr	Hg	As	Se	Sr	Cd	U	W
0,25	0,0015	0,8008	<0,008	<u>0,5317</u> 6,646	<u>3,8515</u> 48,144	2,563	<u>0,1968</u> 2,46	<u>0,0994</u> 1,243	0,0084	<0,0004	<u>0,2264</u> 2,83	<u>1,5728</u> 19,66	<u>0,0275</u> 0,344	0,0539	<0,0008	<0,0016	0,0031	0,3838	<u>0,0107</u> 0,134	0,0032	0,0026
0,5	0,0059	6,5286	<0,013	<u>1,4564</u> 11,348	<u>15,588</u> 121,78	8,581	<u>0,3421</u> 2,673	<u>0,5289</u> 4,132	0,0431	0,3424	<u>1,5393</u> 12,06	<u>1,5652</u> 12,228	<u>0,1606</u> 1,255	0,2026	<0,0013	<0,0026	0,09	2,7941	<u>0,0372</u> 0,291	0,062	0,0063
1	0,0081	7,0523	0,115	<u>0,1178</u> 0,92	<u>9,5278</u> 74,436	6,079	<u>0,876</u> 6,844	<u>0,508</u> 3,969	0,0232	0,0946	<u>4,5504</u> 35,55	<u>0,3136</u> 2,45	<u>0,0963</u> 0,752	0,1759	<0,0013	<0,0026	0,0525	3,1269	<u>0,0141</u> 0,11	0,0553	0,0013
1,5	0,0043	11,555	<0,014	<u>0,0497</u> 0,355	<u>11,433</u> 81,665	6,663	<u>0,8982</u> 6,416	<u>0,3413</u> 2,438	0,0136	<0,0007	<u>2,0216</u> 14,44	<u>0,2604</u> 1,86	<u>0,071</u> 0,507	0,1476	<0,0014	<0,0028	0,0424	4,4915	<u>0,013</u> 0,093	0,2069	0,0027
1,75	0,0036	19,386	0,425	<u>0,0392</u> 0,28	<u>9,561</u> 68,293	7,534	<u>6,5874</u> 47,053	<u>0,3899</u> 2,785	0,0258	<0,0007	<u>1,1663</u> 8,331	<u>0,25</u> 1,1786	<u>0,0582</u> 0,416	0,1296	<0,0014	<0,0028	0,0924	7,1956	<u>0,0137</u> 0,098	0,0232	0,0031
2	0,0046	27,754	0,051	<u>0,0347</u> 0,228	<u>10,82</u> 71,184	7,081	<u>1,1379</u> 4,486	<u>0,3903</u> 2,568	0,0301	0,1819	<u>1,0328</u> 6,795	<u>0,2669</u> 1,756	<u>0,066</u> 0,434	0,1594	<0,0015	<0,003	0,2092	10,265	<u>0,0163</u> 0,107	0,2074	0,0026
2,5	0,0047	25,966	0,039	<u>0,0517</u> 0,34	<u>8,554</u> 56,276	6,348	<u><0,003</u> <0,2	<u>0,7503</u> 4,936	0,064	<0,0008	<u>2,505</u> 16,48	<u>2,4629</u> 16,203	<u>0,209</u> 1,375	0,2184	<0,0015	<0,003	0,3501	9,9654	<u>0,0275</u> 0,181	0,0748	0,004

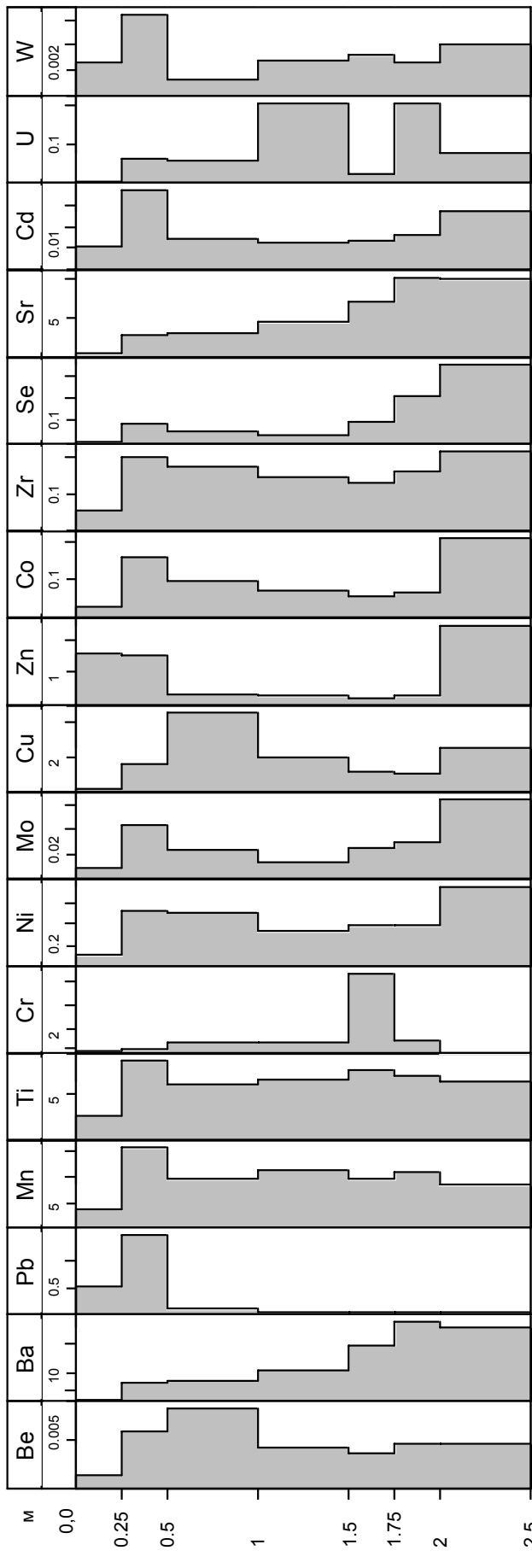


Рис. 9.5. Распределение макроэлементов по профилю (глубине) торфяной залежи низинного болотного массива Узкий Мох (скв. 2), мг/л

Таблица 9.5. Содержание макроэлементов в торфах низинного (евтрофного) болотного массива Космозерское (скв. 6), мг/л

Глубина, м	Вид торфа	Степень разложения, %	pH (водн.)	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
0,25	Древесно-осоковый низинный	30	5,3	36,09	27,61	881,57	167,02	910,81	830,03
0,5	То же	30	5,3	12,96	12,92	870,29	134,13	665,53	745,6
1	То же	25	5,4	17,75	20,48	854,1	142,13	705,32	822,59
1,4	Древесный низинный	40	5,3	208,8	202,23	1525,54	318,8	1863,64	2527,2
1,5	Глина		5,4	14 552	17 364	7001	14 012	26 072	18 900

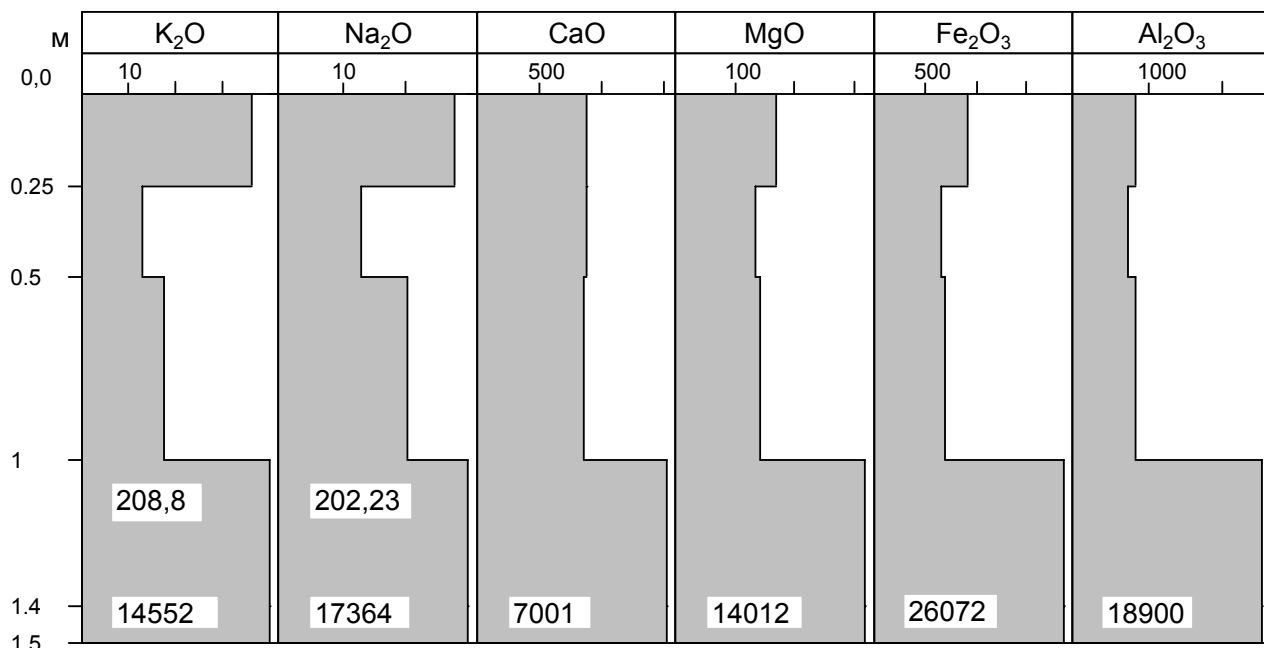


Рис. 9.6. Распределение некоторых макроэлементов по профилю (глубине) торфяной залежи болота Космозерское (скв. 6), мг/л

в грунтовых водах в прошлом. Следовательно, низинные торфяные болота будут накапливать тяжелые металлы при их поступлении из техногенных зон.

Адсорбционными свойствами обладает только верхний 0,3 м слой низинных болот, а вся остальная часть торфяной залежи, расположенная ниже грунтовых вод, в обменном процессе, по-видимому, не участвует. Можно предположить, что допустимые пределы концентрации тяжелых металлов в поверхностном 0,3 м слое торфа низинных болот близки к максимальному содержанию этих элементов в придонных слоях торфяных залежей. Накопление более высоких количеств тяжелых металлов в верхних слоях торфяной залежи может привести к гибели растительности болот. Вероятно, в связи с этим произойдет увеличение выноса тяжелых металлов с поверхности погибших болот в результате вторичной минерализации торфа.

Уран содержится во всех слоях торфяных залежей изученных болот независимо от их минерального питания (грунтового или атмосферного).

Благодарности

Выражаю благодарность Н. В. Стойкиной за выполнение ботанического состава торфов, В. А. Степаненковой и П. Н. Токареву – за помощь в отборе образцов во время полевых исследований. Благодарю также С. А. Кутенкова за разрешение использовать разработанную им программу-макрос в MS Excel для построения диаграмм.

Литература

- Бахнов В. К., 1986. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск: Наука. 192 с.
- Бухман В. А., 1959. К характеристике агрохимических свойств торфяно-болотных почв Карелии // Торфяные болота Карелии. Петрозаводск. С. 147–159.
- Бухман В. А., 1960. К характеристике агрохимических свойств основных типов торфяных почв Карелии // Почвоведение. № 11. С. 99–105.
- Волкова В. И., Кузнецов О. Л., 1977. Торфяные залежи и их агрохимическая характеристика // Биологические ресурсы района Костомукши, пути их освоения и охраны. Петрозаводск. С. 23–31.

Таблица 9.6. Содержание микроэлементов в торфах (0,25–1,4 м) и подстилающем грунте (1,5 м) низинного (евтрофного) болотного массива (№ 478) Космозерское (скв. 6), в числителе – мг/л, в знаменателе – мг/кг

Глубина, м	Be	Ba	B	Pb	Mn	Ti	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Zn	Co	Zr	Hg	As	Se	Sr	Cd	U	W
0,25	0,0134	6,0581	<0,0128	1,1936 9,325	65,999 515,62	7,828	1,2456 9,731	0,8536 6,669	0,1838	0,8654	3,2319 25,249	6,0442 47,22	1,0804 8,441	0,2304	<0,0013	<0,0026	0,0628	1,8734	0,0605 0,0473	0,1212	0,0072
0,5	0,0157	4,4416	<0,0128	0,4186 3,27	65,525 511,916	6,588	1,3004 10,159	0,759 5,93	0,1005	0,8603	3,8776 30,294	0,6486 5,067	0,539 4,211	0,1935	<0,0013	<0,0026	0,0612	1,7925	0,0268 0,209	0,1742	0,0035
1	0,0173	4,6482	<0,0116	0,1987 1,713	53,817 463,94	9,3325	1,3273 11,442	0,7912 6,821	0,0789	0,5933	4,4815 38,634	0,6533 5,632	0,5391 4,647	0,2013	<0,0012	<0,0023	0,06	1,8108	0,0277 0,239	0,2212	0,0013
1,4	0,0444	13,848	<0,0152	0,4154 2,733	73,842 485,804	55,784	2,6332 48,656	1,6957 11,156	0,054	1,1946	5,406 35,566	1,4569 9,585	0,6693 4,403	1,0111	<0,0015	0,029	0,1172	4,7249	0,0383 0,252	0,4241	0,0094
1,5	0,895	512,36	<0,1	8,975	307,27	2561	62,88	34,817	0,146	54,078	30,611	51,37	11,47	46,251	<0,01	4,407	0,683	97,205	0,125	3,646	0,344

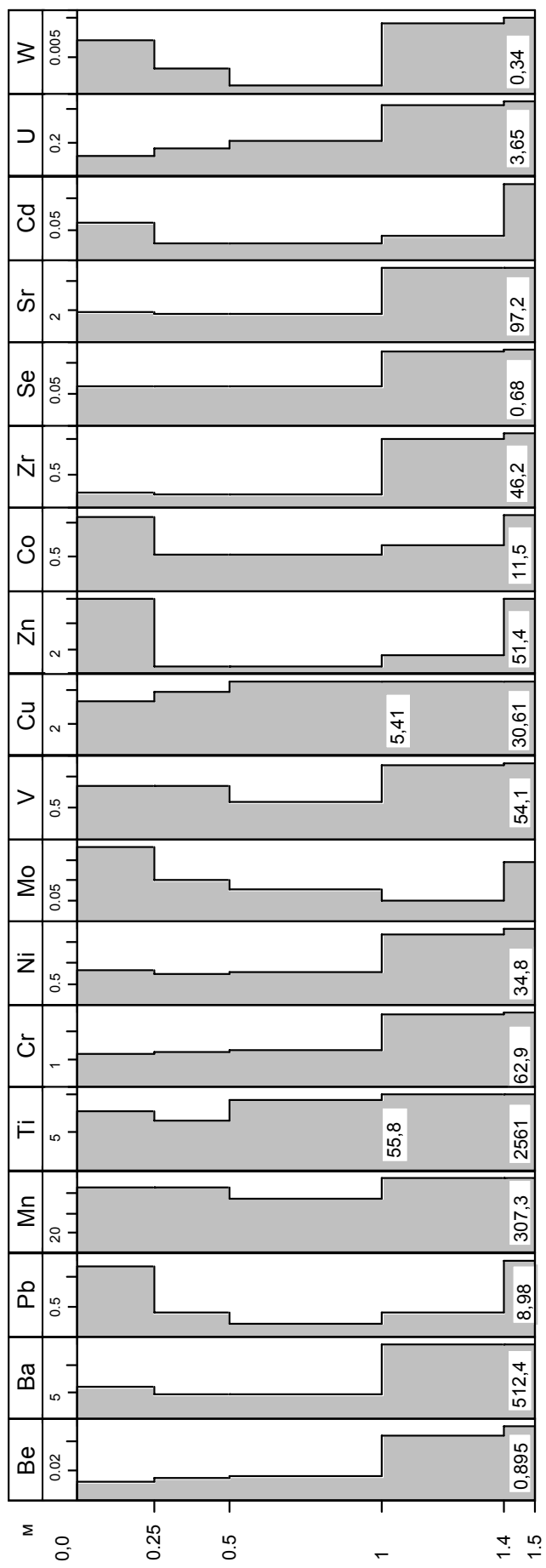


Рис. 9.7. Распределение микроэлементов по профилю (глубине) торфяной залежи низинного болотного массива Космозерское (скв. 6), мг/л

Таблица 9.7. Содержание тяжелых металлов в лесной подстилке Медвежьегорского района (Федорец и др., 1998), поверхностном горизонте (0,25 м) низинной и верховой торфяных залежей исследованных болот

	Содержание, мг/кг	Ni	Cu	Co	Cr	Pb	Cd	Zn	Fe	Mn
Лесная подстилка	max	3,44	5,74	8,1	6,9	5,4	0,41	57,1	847,1	660
	min	1,62	3,24	0,56	0	2,8	0,23	26,68	95,5	252
	среднее	2,2	3,92	1,94	4,15	4,5	0,31	38,12	193,1	400,6
Низинная торфяная залежь	max	6,669	25,25	8,441	9,731	9,325	0,134	47,22	4976	515,6
	min	1,243	2,83	0,344	2,46	6,646	0,047	19,66	834	48,14
Верховая торфяная залежь	среднее	3,956	14,04	4,388	6,096	7,98	0,091	33,44	2905	281,9
	среднее	1,705	1,828	0,413	5,882	9,936	0,258	13,35	1111	6,813

Елина Г. А., Кузнецов О. Л., Максимов А. И., 1984. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии / Ред. Н. И. Пьявченко. Л.: Наука. 128 с.

Иванов К. Е., 1953. Гидрология болот. Л. 299 с.

Козловская Л. С., Медведева В. М., Пьявченко Н. И., 1978. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука. 172 с.

Крештапова В. Н., 1974. Методические рекомендации по оценке содержания микроэлементов в торфяных месторождениях европейской части РСФСР. М. 200 с.

Кузнецов О. Л., Тойкка М. А., 1985. Микроэлементы в торфяных залежах низинных и переходных болот Карелии // Вопросы экологии растений болот, болотных местообитаний и торфяных залежей. Петрозаводск. С. 140–157.

Кузнецов О. Л., Тойкка М. А., Максимов А. И., 1983. Содержание микроэлементов в торфяных залежах верховых болот южной Карелии // Структура растительности и ресурсы болот Карелии. Петрозаводск. С. 160–171.

Кузнецов О. Л., Шевелин П. Ф., Максимов А. И., 1998. Растительность, генезис и динамика болот западного побережья озера Пяозеро (северо-западная Карелия) // Биоразнообразие, динамика и охрана болотных экосистем восточной Финляндии. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 31–63.

Лопатин В. Д., 1949. О гидрологическом значении верховых болот // Вестник ЛГУ. № 2. С. 37–39.

Лопатин В. Д., 1976. Рецензия // Ботан. журн. Т. 61, № 10. С. 1482–1485. Рецензия на книгу: Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука, 1974. 254 с.

Максимов А. И., 1984. Классификация торфов Карелии и их агрохимические свойства // Материалы VII Всесоюзного совещания по болотоведению. Калинин. С. 23–31.

Максимов А. И., 1988. Агрохимическая характеристика видов торфа Карелии // Болотные экосистемы Европейского Севера. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. С. 163–179.

Максимов А. И., 1999. Макро- и микроэлементный состав торфяных залежей Заонежского полуострова (на примере болот Замощье и Боярщина) // Острова Кижского архипелага. Биогеографическая характеристика: Тр. Карельского научного центра РАН. Серия «Биогеография Карелии». Вып. 1. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 55–62.

Максимов А. И., Егорова Г. Ф., Степаненкова В. А., Ширяева Т. А., 1991. Геохимическая характеристика торфяных залежей // Методы исследований болотных экосистем таежной зоны. Л.: Наука. С. 97–110.

Перельман А. И., 1968. Геохимия эпигенных процессов (зона гипергенеза). Л. 300 с.

Перельман А. И., 1975. Геохимия ландшафта. М. 342 с.

Тойкка М. А., Перевозчикова Е. М., Левкина Т. И. и др., 1973. Микроэлементы в Карелии. Л. 284 с.

Федорец Н. Г., Дьяконов В. В., Литинский П. Ю., Шильцова Г. В., 1998. Загрязнение лесной территории Карелии тяжелыми металлами и серой. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 47 с.

Хмелев К. Ф., 1985. Закономерности развития болотных экосистем Центрального Черноземья. Воронеж. 168 с.

Kuznetsov O. L., Maksimov A. I., 1995. Mire ecosystems of the western part of the Soujarvi region // Karelian Biosphere Reserve Studies. Joensuu. P. 249–256.

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ЗАОНЕЖЬЯ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Д. С. РЫБАКОВ

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Построены ландшафтно-геохимическая карта масштаба 1 : 200 000 и карта эколого-геохимического районирования того же масштаба, интегрирующие полученные в ходе настоящих исследований данные об эколого-геохимическом состоянии Заонежья.

Легенда ландшафтно-геохимической карты состоит из трех блоков (уровней). В первом блоке выделены классы геохимических ландшафтов, которые различаются по характеру миграции химических элементов в почвенных водах. Выделены: кислый (H), кислый глеевый (H-Fe), переходный от кислого к кальциевому (H-Ca) и переходный от кислого глеевого к кальциевому (H-Fe-Ca) классы.

Второй блок легенды включает границы элементарных ландшафтов, выделенных по интенсивности физико-механической миграции вещества, определяемой рельефом местности. Выделяются элювиальные, трансэлювиальные (склоновые) и супераквальные (надводные), субаквальные (подводные) элементарные ландшафты.

Третий блок легенды характеризует геохимические ландшафты по составу почвообразующих пород.

Карта эколого-геохимического районирования масштаба 1 : 200 000 составлена с использованием полученной ландшафтно-геохимической карты (как основы), картографических данных о положении месторождений и проявлений уран-ванадиевых руд района, данных ГП «Невскгеология» о концентрации химических элементов в указанных рудах, подземных водах Космозерско-Падминского рудного узла, выявленных геохимических аномалиях урана в коренных породах и тяжелых металлов – в подземных водах и четвертичных отложениях.

Предложена схема потенциального поверхностного загрязнения токсикантами экосистемы водосбора р. Падмы и оз. Падмозеро.

D. S. RYBAKOV. ECOLOGICAL-GEOCHEMICAL MAPPING OF ZAONEZHJE AND FORECAST EVALUATION OF TECHNOGENIC POLLUTION OF THE LOCAL ECOSYSTEMS

Geochemical landscapes map on a 1 : 200 000 scale and ecological-geochemical regionalization map on a same scale of Zaonezhje was constructed. The maps integrated data on ecological-geochemical conditions of Zaonezhje area was collected during the research.

Legend of the geochemical landscapes map includes three levels. The first one is included geochemical landscapes classes was distinguished by migration character of chemical elements in the soil water. Acid (H), acid gleyish (H-Fe), transitional from acid to calcium (H-Ca) and transitional from acid gleyish to calcium (H-Fe-Ca) classes was distinguished.

The second level of the map legend is included boundaries of elemental landscapes was distinguished by intensity of physical-mechanical migration of matter determined relief of locality. There are eluvial, transeluvial (by slopes), superaqueous and subaqueous elemental landscapes.

The third level of map legend is characterized geochemical landscapes by composition of soil-forming rocks.

Ecological-geochemical regionalization map on a 1 : 200 000 scale was constructed by using of the geochemical landscapes map (as basis), mapping data on location of uranium-vanadium ore deposits and mineral occurrences of area, data of GE Nevskgeologiya on concentration of chemical elements in the ores, underground waters

of Kosmozzero-Padminsky ore bundle, revealing geochemical anomalies of uranium in the rocks and heavy metals – in underground waters and quaternary deposits. Scheme of potential superficial pollution of Padma river watershed and Padmozzero lake are proposed.

Ключевые слова: эколого-геохимическое картирование, Заонежье, техногенное загрязнение.

Основными объектами исследований при эколого-геохимическом картировании являются горные породы, почвы, подземные воды, геохимические процессы, происходящие в естественных и нарушенных условиях, а также техногенные объекты и геолого-технические системы, влияющие на эколого-геохимическое состояние и параметры верхних горизонтов литосферы (Теория..., 1997; Экологические функции литосферы, 2000 и др.).

При определении степени воздействия хозяйственного объекта на окружающую природную среду учитываются особенности миграции потенциально опасных элементов в условиях конкретного геохимического ландшафта. На основе теории геохимических барьеров А. И. Перельмана для конкретных регионов строятся ландшафтно-геохимические карты разных масштабов. Они несут информацию, необходимую для районирования территорий по устойчивости ландшафтов к загрязнению, а также для дальнейшего прогнозирования эколого-геохимических процессов, в том числе неблагоприятных и опасных, в случае какого-либо антропогенного воздействия.

В ходе работ в масштабе 1 : 200 000 представлены ландшафтно-геохимическая карта (основа) и карта эколого-геохимического районирования, интегрирующие основные имеющиеся эколого-геохимические данные о современном состоянии приповерхностной части литосферы в районе Заонежья.

Ландшафтно-геохимическая карта (основа) Заонежья масштаба 1 : 200 000

Ландшафтно-геохимическая карта Заонежья отражает условия миграции химических элементов на изученной территории. По причине отсутствия представительной выборки для расчета фоновых концентраций эта карта приводится лишь в виде своей ландшафтной основы (прил. 4). При ее построении использовались картографические материалы Р. М. Морозовой, А. Д. Лукашова и других авторов.

Исходя из теории геохимических барьеров А. И. Перельмана и учений о ландшафтах Б. Б. Полюнова и М. А. Глазовской, легенда данной карты составлена из трех блоков. В первом блоке выделяются классы геохимических ландшафтов (ГЛ), характеризующие обстановку миг-

рации химических элементов в почвенных водах. На территории Заонежья выделены и показаны на карте кислый (Н), кислый глеевый (Н-Fe), переходный от кислого к кальциевому (Н-Ca) и переходный от кислого глеевого к кальциевому (Н-Fe-Ca) классы ГЛ. Эти четыре градации определяют цветовую закрашку карты.

Автономные ГЛ *кислого класса* распространены преимущественно в западной и юго-западной частях изучаемого района (прил. 4). Они характеризуются присутствием в почвенных водах в качестве типоморфного иона водорода (H^+). Данный ион определяет кислую реакцию почвенных вод подзолистых почв: значение pH (по солевой вытяжке KCl) колеблется от 3–4 (среднее 3,3)* для почвенных горизонтов A_1 и A_1A_2 ($n = 4$) до 5,5 (среднее 4,4) для горизонта BC подзолистых почв ($n = 10$). Как известно (Перельман, 1989), в подобных ГЛ наблюдается активная миграция многих металлов, в том числе Zn, Cu, Ni, Pb, Cd. Подвижность V, Mo, Se, U, Re и других анионогенных элементов определяется окислительной обстановкой, но сдерживается относительно низкими значениями pH среды. Гумусово-аккумулятивный горизонт слабо развит. Его мощность составляет в основном 5–6, редко до 12–15 см. Иногда (в подзолах) он полностью отсутствует.

К этому же классу относятся ландшафты верховых болот. К особенностям верховых болот следует отнести: 1) очень низкие показатели pH (3,0–3,5 по солевой вытяжке KCl) (Почвы Карелии, 1981); 2) автономность; 3) бедность элементами-биофилами (Перельман, 1966). Автономность верховых болот проявляется в их зависимости от вод атмосферных осадков и отсутствия связи с грунтовыми и подземными водами. В результате подстилающие горные породы вообще не вовлечены в миграционные процессы (Перельман, 1966). Это влияет на уменьшение содержания макро- и микроэлементов в болотных почвах. Показатели pH снижаются благодаря сфагновым мхам, дающим большое количество кислых гумусовых веществ.

В случае загрязнения ГЛ верховых болот бурт накапливать загрязнители вследствие нали-

* Здесь и далее, если нет ссылки на другой источник, значения pH определены в Лаборатории лесного почвоведения и микробиологии Института леса Карельского научного центра РАН.

чия сорбционных геохимических барьеров в профиле болотных почв. Почвы верховых болот характеризуются очень низким и низким потенциалом самоочищения от органических и минеральных загрязняющих веществ (Требования..., 1999).

Кислый глеевый класс ГЛ включает в себя ландшафты низинных и переходных болот, а также участков заболоченного леса. Наибольшие площади такие ландшафты занимают в юго-восточной части Заонежского полуострова. Кроме иона водорода типоморфным здесь также является двухвалентное железо, определяющее восстановительный характер среды. Здесь могут хорошо мигрировать Zn, Cu, Ni, Cd, Co, однако инертными остаются аниогенные элементы: V, Mo, Se, U, Re, Cr и др. В судьбе ряда элементов (B, Zn, Cu, Mn, Co, Mo, Se и др.), так же как и в других ГЛ, существенную роль играет биогенный фактор.

Класс переходный от кислого к кальциевому характеризуется наличием в почвах этого класса обломков основных и карбонатных пород, обуславливающих нейтральную и слабощелочную реакцию почвенных вод. В этих водах определенную роль для хода миграции химических элементов, помимо иона водорода, начинает играть катион Ca^{2+} . Вымывание сульфидов, которые в том или ином количестве могут присутствовать в обломках широко развитых в Заонежье шунгитонесущих пород (Филиппов, 2002), дает кислую реакцию и способно несколько исказить картину. Видимо, поэтому значения pH в пробах (по солевой вытяжке KCl) колеблются от 3,9 до 6,5 (среднее 4,8) для почвенного горизонта A_1 ($n = 4$) и от 4,2 до 6,5 (среднее 5,3) для горизонта BC ($n = 4$) шунгитовых почв. Эти данные требуют дальнейшего уточнения. По мере увеличения щелочности почвенных растворов, в окислительной обстановке в них все труднее мигрируют катиогенные элементы и легче – аниогенные. В накопление Zn, Cu, Mo, Se и других элементов существенный вклад вносит биогенный фактор. Шунгитовые почвы, развитые в таких переходных ландшафтах, как правило, имеют в почвенном профиле относительно хорошо выраженный гумусовый горизонт мощностью в основном 20–30, иногда до 40 см, за счет чего возникает дополнительная способность к сорбции в этих почвах различных химических элементов. Распространенность ГЛ H-Ca-класса определяется наличием в районе почвообразующих основных и особенно карбонатных пород, а также шунгитов и мажоритов, в состав которых, в частности, входят кальцит и доломит.

Класс переходный от кислого глеевого к кальциевому формируется за счет возникновения искусственных ГЛ на месте осушенных болотных экосистем. Мелиорация сначала приводит к более сухим окислительным условиям, повышается значение катиона Ca^{2+} и других элементов питания растений (N, K, P, Mg), прежде всего, за счет увеличения количе-

ства остатков органического вещества (опада), возрастает значение показателя pH. В дальнейшем экосистема постепенно деградирует (изменяется структура и видовой состав болот), теряется плодородие почв, возникают иные негативные эффекты (Харькина, 2001). Все это также приводит к определенным изменениям в процессах миграции и концентрации химических элементов, требующим дополнительного изучения.

Второй блок легенды ландшафтно-геохимической карты включает границы элементарных ландшафтов, выделенных по интенсивности физико-механической миграции вещества, определяемой рельефом местности. Выделяются *элювиальные, трансэлювиальные (склоновые) и супераквальные (надводные) элементарные ландшафты*. Дно водоемов района, формирующееся толщей осадков, представляет собой *субаквальные (подводные) ландшафты*, для которых характерен наибольший привнос материала с жидким и твердым боковым стоком.

Третий блок легенды характеризует геохимические ландшафты по составу почвообразующих четвертичных, редко (до 3–5% случаев) коренных пород. На территории района состав четвертичных отложений во многом зависит от состава коренных докембрийских образований, наследуя из них ряд химических элементов, в том числе Cu, Co, Mn, Mo, U, реже V, Ni, Zn, Pb, As, Bi (Инвентаризация..., 2000; Оценка..., 2001; Прогнозная оценка..., 2001).

Механический состав четвертичных отложений (размер частиц слагающего их материала) определяет способность пород, с одной стороны, к сорбции химических элементов (что особенно характерно для глин и суглинков, а также торфа), с другой – к фильтрации водных растворов (пески, супеси и т. д.).

При детализации ландшафтно-геохимических исследований необходимо получение статистически представительной геохимической информации для расчета фоновых концентраций химических элементов. При этом следует учитывать влияние хозяйственной деятельности человека, так или иначе преобразующей ГЛ, как, например, в случае трансформирующихся с течением времени ландшафтов осушенных болот.

Карта эколого-геохимического районирования масштаба 1 : 200 000

Карта эколого-геохимического районирования Заонежья масштаба 1 : 200 000 (рис. 10.1) составлена с использованием описанной ландшафтно-геохимической основы, сведений о положении месторождений и проявлений уран-ванадиевых руд района, концентрации химических элементов в указанных рудах, почвах, а также в подземных водах Космозерско-Падминского рудного узла, выявленных геохимических аномалиях урана в коренных породах,

тяжелых металлов – в подземных водах и четвертичных отложениях (Оценка..., 2001). В целом данная карта заметно упрощает представление об эколого-геохимических условиях состояния приповерхностной части литосферы в районе исследований по сравнению с ландшафтно-геохимической основой, отражающей чрезвычайную пестроту и перемежаемость представленных эколого-геохимических обстановок.

На представленной карте (рис. 10.1) цветовой гаммой в первом блоке легенды выделены области, характеризующиеся разным потенциалом самоочищения от токсикантов, распространенных в горных породах и рудах изучаемого района:

- области с низким потенциалом самоочищения (преимущественного накопления и закрепления химических элементов): ГЛ с глеевыми и сорбционными геохимическими барьерами низинных и переходных болот и других понижений в рельефе, характеризующихся восстановительной обстановкой. В том числе за счет сорбции накапливаются (Оценка..., 2001): Mn, Co, Ni, V, Cr, Cu, Zn, Pb, Mo, Sr, U, Th, Ra. Определенная часть металлов все же мигрирует в ионной форме. Например, известно (Перельман, 1989), что в таежных болотах Cu^{2+} и Mn^{2+} мигрируют совместно с Fe^{2+} . Из-за низких значений Eh болотных вод возможна также миграция Co^{2+} и Ni^{2+} (там же). ГЛ верховых болот, несмотря на свою автономность, вследствие большого потенциала сорбционных и биогенных процессов также отнесены к спектру областей преимущественного накопления элементов. К ГЛ с низким потенциалом самоочищения отнесены и болотные экосистемы, преобразованные в результате мелиорации;

- области со средним потенциалом самоочищения: ГЛ переходного Н-Са класса с относительно развитым гумусово-аккумулятивным горизонтом почв, но с бóльшими, по сравнению с другими представленными в Заонежье ГЛ, значениями pH почвенных вод (см. выше). В этих ГЛ, достигающих нейтральной, иногда слабощелочной реакции почвенных вод, в существующей здесь окислительной обстановке подвижность Se, Mo, V, U и других аниогенных элементов, а также риск загрязнения этими элементами биоты может быть выше, чем в ГЛ со слабокислой реакцией почвенных растворов. К сдерживающим миграцию элементов факторам относится сорбция;

- области с высоким потенциалом самоочищения: ГЛ с кислой и слабокислой реакцией почвенных вод, окислительной обстановкой и относительно небольшим количеством природных сорбентов. Эти области характеризуются максимальной подвижностью Zn, Pb, Cd, Cu и других катиогенных элементов и риском загрязнения этими элементами биоты. Указанные токсиканты в данных ГЛ быстрее выносятся водными потоками в водоемы и в конечном итоге накапливаются в донных осадках.

Во втором блоке легенды выделены площади распространения комплексов с повышенной сорбционной способностью – четвертичных биогенных отложений и озерно-ледниковых глин, в которых в случае загрязнения могут сорбироваться V, Zn, Ni, Co, Ba, Cu, Pb, U, As, Mo, Hg, Ra и другие элементы.

Дополнительно на карте показаны: а) геохимические аномалии в различных природных средах (U – в коренных породах, тяжелых металлов – в четвертичных отложениях и подземных водах); б) положение месторождений и проявлений комплексных уран-ванадиевых руд; в) немасштабные участки ландшафтов, нарушенные горными выработками.

Следует подчеркнуть, что отмеченные на карте *геохимические аномалии U* могут оказаться экологически опасными только в случае вывода горных пород и руд на дневную поверхность. Кроме U в этом случае будут представлять опасность и другие сопутствующие ему элементы-токсиканты (V, Mo, Se, Zn, Pb, Li и др.).

Среди химических элементов, формирующих комплексные природные *геохимические аномалии в четвертичных отложениях*, выделяются Cu, Co, Mo, Pb и другие. Так, кларки концентраций (kk) некоторых элементов-токсикантов в болотно-торфяных отложениях, наиболее загрязненных из всех четвертичных образований, достигают очень высоких значений: As – более 500, U – 40–200, Zn – 24–120 и более, Mo – до 36, Pb – до 32 (Оценка..., 2001). Велика, как отмечается, доля подвижных форм. Например, доля подвижного U «болотных» аномалий достигает 75% (там же).

Работами ГП «Невскеология» (Оценка..., 2001) в районе выявлен ряд *геохимических аномалий некоторых химических элементов в подземных водах*. Максимальное содержание микроэлементов в подземных водах по этим данным достигает (в мкг/л, в скобках даны ПДК): Ba – 440 (100); Mo – 300 (250); U – 200 (1800); Sr – 142 (2000); Mn – 38,7 (100); Ti – 14,3; Al – 13,4 (500); Li – 10,7 (10000); Zr – 5; Th – 4,6; Cu – 3 (100); Cr – 2,2 (Cr^{3+} – 500; Cr^{6+} – 50); V – 2 (100); Ni – 0,88 (100); Ag – 0,714 (50); Pb – 0,71 (30); Sn – 0,71. Графическая информация приводится только по шести элементам (в различных сочетаниях): Co, Pb, Ag, Zn, Ni, Cu. Границы соответствующих гидрогеохимических аномалий вынесены на искомую карту. Судя по приведенным концентрациям, отмеченные гидрогеохимические аномалии не относятся к патогенным. Большинство из них имеет достаточно широкое распространение, а их проекции на дневную поверхность пересекают до нескольких частных водосборов поверхностных вод рек и озер. Подобное обстоятельство может свидетельствовать о потенциальной опасности постепенного широкого загрязнения подземных вод района в случае попадания в них сточных вод горнорудного или иного потенциально опасного производства.

Месторождения и проявления уран-ванадиевых руд могут, как уже указывалось, представлять опасность в случае разубоживания насыщенных токсикантами руд и вмещающих пород. Вокруг Среднепадминского месторождения в настоящее время уже выделена санитарно-защитная зона радиусом 1 км от пункта консервации оставшейся после проведенной предварительной разведки месторождения уран-ванадиевой руды. В этой зоне запрещено проживание людей, занятие сельским хозяйством и питьевой водозабор. Радиус зоны наблюдения составляет 5 км (Оценка..., 2001).

Наличие значительного количества сульфидов в шунгитовых породах при выводе последних на дневную поверхность (Забогинское и Максовское месторождения) в условиях влажного климата способствует быстрому формированию кислых вод, обогащенных элементами-токсикантами (As, Cd, Se, Pb, Co, Mo, Sb, U и др.), ущерб от которых не оценен (Оценка..., 2001).

Для территории Заонежья по данным 69 анализов отмечается повышенный условный местный фон концентрации в почвах As – среднее геометрическое по всем изученным ГЛ и почвенным горизонтам 10,4 мг/кг (пределы 2,01–35,1 мг/кг) при кларке 1,7 мг/кг, ПДК 2 (по транслокационному показателю) и 10 (по общесанитарному показателю) мг/кг. Распределение As в почвах зависит от ряда факторов. С одной стороны, рост его концентраций связан с уменьшением содержания Са и, как следствие, увеличением почвенной кислотности. Поэтому его больше в гумусовом горизонте, характеризующемся также наличием органических сорбентов. С другой стороны, в минерально-насыщенных горизонтах почв (гумусовом и иллювиальном), расположенных ближе к почвообразующим породам (n = 46), As ассоциируется с Fe и Mg (Рыбаков, 2004).

Пример использования эколого-геохимической информации для прогнозных оценок техногенного загрязнения на участке Среднепадминского месторождения

Среднепадминское месторождение относится к урановому типу, с которым связывают первичные геохимические ореолы U, Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, Co, Ni, V, As (Войткевич и др., 1990). Анализ показывает, что для исследуемого объекта данный список может быть дополнен Bi, Se, Re, Cr, Ba, Li и другими элементами (Металлогения Карелии, 1999; Оценка..., 2001; Прогнозная оценка..., 2001).

На участках, примыкающих к месторождению, могут формироваться глеевые, кислые, щелочные, сорбционные, а также окислительные (кислородные) геохимические барьеры (Прогнозная оценка..., 2001; Рыбаков, 2002).

Для участка месторождения и связанных с ним экосистем, включая р. Падму и оз. Падмозеро, предлагается следующая схема потенциального поверхностного загрязнения, вытекающая из картографических построений, их описания, а также данных о содержании опасных элементов в водах, почвах и четвертичных отложениях (суглинках и глинах) рассматриваемого участка.

1. Сточные воды из примыкающей к промплощадке месторождения канавы, в десятки и даже тысячи раз по сравнению с фоном обогащенные элементами-токсикантами (табл. 10.1), поступают (реальные условия загрязнения) в ближайшее низинное болото, на границе которого существует глеевый геохимический барьер. При смешении слабощелочных рудничных вод с кислыми водами болота также возникает кислый геохимический барьер. Именно по этим причинам ближе к краевой части болота наиболее интенсивно концентрируются (в скобках указаны предельные кларки концентраций* – kk_{max}): Mo (87,3), V (22,2) и Cr (2,4). Накопление Pb (kk_{max} 7,5) может быть обусловлено процессами сорбции и, возможно, биологическим захватом, а его поступление в окружающую среду – работой горнорудной техники и привлеченного автотранспорта. Низкие концентрации Cu ($kk < 1$) связаны, вероятно, с проблематичностью ее извлечения из обломков горных пород и руд слабощелочными рудничными водами по аналогии

Таблица 10.1. Концентрации U, Mo и V в водах участка Среднепадминского месторождения, мкг/л

	U	Mo	V
Речная вода (р. Падма) ¹	0,042–0,072	0,08–0,09	0,21–0,35
Подземные воды (из скважин) ¹	0,08–25,4	0,17–28,5	0,08–6,1
Ствол разведочной шахты (глубина 154 м) ²	0,2–1,3	1–4	24
Горизонтальные выработки, вскрывшие руденение (горизонт – 74 м) ²	30–1000	20–30	100–140
Вода из канавы (поверхностные условия выщелачивания руд) ¹	600	100	9
Поверхностные воды	0,08–0,42 ³	1,0 ⁴	0,9 ⁴
Подземные воды	–	0,2 ⁵	0,63 ⁵

Примечание. ¹ – данные Г. С. Бородулиной и С. И. Мазуиной (Прогнозная оценка..., 2001); ² – Оценка..., 2001; ³ – региональный гидрохимический фон (Прогнозная оценка..., 2001; со ссылкой на данные В. В. Титова); ⁴ – фоновое содержание в природных водах (Методические рекомендации..., 1986); ⁵ – среднее содержание в зоне активного водообмена (Методические рекомендации..., 1986).

* Содержание элементов определено в Институте геологии Карельского научного центра РАН: V, Pb, Cr, Cu, Ba, Sr, Mn, Ni, Co – количественным, Mo, B, Zn – полуколичественным спектральным анализом. Подготовка проб для анализа включала тщательное их высушивание на воздухе и дальнейшее прокаливание в течение 2 ч в муфельной печи при t = 400 °С. Здесь и далее концентрации пересчитаны на воздушно-сухую навеску с учетом потерь при прокаливании (ппп).

с процессами, идущими в шунгитовых почвах (Тойка и др., 1973).

При удалении от краевой части болота большее значение приобретает сорбционный барьер, связанный с болотной органикой и торфом. Из всех полученных нами данных следует, что на этом сорбционном барьере при слабом изменении концентраций могут относительно накапливаться (кк): В (3,7–4,5), Zn (1,4–2,7), Sr (0,3–0,4) и Mn (0,5–0,8). Динамика поведения Ni и Co (кк 1,6–1,7) еще менее выражена.

В глинах и суглинках, которые в условиях глеевой обстановки также могут проявлять сорбционные свойства, слабо концентрируются (кк): Cu (0,8–1,0), Co (1,8–2,2), Ni (0,8–1,1), Zn (не обн. – 2,6), Ba (1,4–2,2).

2. При разработке комплексных уран-ванадиевых руд Среднепадминского месторождения следует ожидать постепенного смещения линии взаимодействия кислородной и глеевой обстановок вглубь (около 500 м) занимаемой низинным болотом и заболоченным лесом территории (в том случае, если эта территория сразу не будет засыпана под часть производственной площадки месторождения).

3. При смешении трансформированных болотных вод с кислородными водами р. Падмы на окислительном гидролитическом барьере должны осаждаться, в частности, Fe, Mn, Co. Слабощелочная реакция вод реки (рН 7,52–7,8 – данные П. А. Лозовика и др.) будет способствовать дальнейшей миграции аниогенных элементов (в том числе V, U, Mo, Se) в растворенном виде. При этом в случае возникновения щелочного гидролитического барьера при поступлении к нему кислых и слабо-кислых глеевых вод могут осаждаться Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, Cr, As, (U) и некоторые другие элементы (Перельман, 1989).

4. После прохождения устья реки, при ее впадении в оз. Падмозеро, вследствие близких значений рН вод (7,05–8,03 – данные тех же авторов) осаждение тяжелых металлов может быть неустойчивым. Можно предположить, что часть элементов, таких как V, U, Mo, Se, в большей или меньшей степени сохранится в растворенном виде и будет продолжать воздействовать на гидробиоту.

Таким образом, при промышленной разработке уран-ванадиевых руд района только в пределах одного водосбора (оз. Падмозеро) вследствие малой буферной способности экосистемы «болото – заболоченный лес» вероятно загрязнение всей экосистемы р. Падмы – оз. Падмозеро, прежде всего, основными рудными и сопутствующими элементами (в скобках кк элементов в спектре данных руд): Se (865), U (547), Mo (182), V (126), возможно, As (24). Такие тяжелые металлы, как Pb (86), Cd (77), Cu (32), Zn (5,1), будут преимущественно осаждаться на геохимических барьерах и накапливаться в донных осадках р. Падмы. Усло-

вия частичного переноса металлов во взвешенной форме, а равно как и попадания токсикантов через систему р. Падмы – оз. Падмозеро в Повенецкий залив Онежского озера, требуют дополнительного изучения.

Степень загрязнения подземных вод нами не изучалась, однако загрязнение будет иметь место, на что указывают распространение в районе широких природных гидрогеохимических аномалий (рис. 10.1) и принадлежность подземных вод к зоне активного водообмена (Оценка..., 2001).

Следует обратить внимание также на те содержащиеся в уран-ванадиевых рудах опасные элементы, которые могут не только присутствовать в твердой или жидкой фазе, но и в виде ионных соединений формировать ореолы в атмосферном воздухе над рудными телами. К таким элементам, в частности, относится U, фоновые концентрации легкоподвижных форм которого в приземном воздухе возрастают в зависимости от степени освоения соответствующего месторождения (Виноградова и др., 1994).

Дальнейшие эколого- и ландшафтно-геохимические исследования в Заонежье должны быть ориентированы на получение достаточной эколого-геохимической информации для формирования и изучения представительных выборок концентраций токсикантов в различных компонентах литосферы, получения фоновых характеристик и выявления геохимических аномалий в различных средах.

Литература

- Виноградова И. В., Колпакова Н. В., Смирнова М. И., 1994. Легколетучие формы элементов в приземной атмосфере и их роль при экологических исследованиях // Вопросы экологии и охраны природы. Вып. 4. СПб.: СПбГУ. С. 72–77.
- Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г., 1990. Справочник по геохимии. М.: Недра. 480 с.
- Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и Северного Приладожья, 2000 / Под ред. А. Н. Громцева и В. И. Крутова. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 345 с.
- Металлогения Карелии, 1999 / Отв. ред. С. И. Рыбаков, А. И. Голубев. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 340 с.
- Методические рекомендации по геохимическим исследованиям рудных месторождений при проведении геологоразведочных работ для оценки воздействия на окружающую среду горнодобывающих предприятий, 1986. М.: ИМГРЭ. 99 с.
- Оценка радиоэкологического состояния Онежского рудного района, 2001. Объяснит. записка к радиоэкол. карте м-ба 1 : 200 000 листов Р-36-XVII (57, 58) и Р-36-XVIII (59, 60). Отчет Рег. Геоэкол. центра ф-ла ГП «Невскгеология». СПб.
- Перельман А. И., 1989. Геохимия. М.: Высш. шк. 528 с.
- Перельман А. И., 1966. Геохимия ландшафтов. М.: Высш. шк. 392 с.

- Почвы Карелии*: Справ. пособие, 1981 / Сост. Р. М. Морозова, А. М. Володин, М. В. Федорченко и др. Петрозаводск: Карелия. 192 с.
- Прогнозная оценка экологической устойчивости территории в условиях развития горнорудного комплекса Республики Карелия*, 2001. Экол.-экон. оценка ресурсов Республики Карелия. Отч. Ин-та геол. Карельского НЦ РАН. Кн. 2. Петрозаводск.
- Рыбаков Д. С.*, 2002. Средняя Падма: эколого-геологический аспект // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 5. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. С. 92–96.
- Рыбаков Д. С.*, 2004. Соотношение мышьяка и макроэлементов в почвах Заонежья // Биокосные взаимодействия: жизнь и камень. Материалы II междунар. симпоз. СПб. С. 251–254.
- Тойка М. А., Перевозчикова Е. М., Лёвкина Т. И. и др.*, 1973. Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука. 284 с.
- Теория и методология экологической геологии*, 1997 / Под ред. В. Т. Трофимова. М.: МГУ. 368 с.
- Экологические функции литосферы*, 2000 / В. Т. Трофимов, Д. Г. Зилинг, Т. А. Барабошкина и др. Под ред. В. Т. Трофимова. М.: МГУ. 432 с.
- Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1 : 1 000 000*. Приложения, 1999. М.: ИМГРЭ.
- Филиппов М. М.*, 2002. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 280 с.
- Харькина М. А.*, 2001. Экологическая геодинамика и сельское хозяйство // Энергия. № 10. С. 30–37.

КАЧЕСТВО ВОД ОЗЕРА ПАДМОЗЕРО (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ) НА ОСНОВЕ СОСТОЯНИЯ БИОТЫ

Л. П. РЫЖКОВ¹, А. А. ЛУКИН², В. И. КУХАРЕВ², А. В. РЯБИНКИН²,
Т. П. КУЛИКОВА², Н. А. МЕЛЬНИК³, Т. А. ЧЕКРЫЖЕВА², И. М. КРУПЕНЬ²

¹ Петрозаводский государственный университет

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

³ Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра РАН (Апатиты)

Озера Заонежского полуострова, расположенные на территории Республики Карелия, практически не подвергались антропогенному воздействию, и до сих пор качество вод соответствует фоновым показателям. Открытие крупного ураново-ванадиевого месторождения в этом районе может привести к изменению существующей ситуации. Полученные данные свидетельствуют о хрупком равновесии, которое сложилось на этой территории, хотя и установлено, что состав сообществ беспозвоночных и рыб не изменился за последние 40 лет, содержание микроэлементов и радионуклидов в организме рыб находится на крайне низком уровне и не представляет опасности для их здоровья.

L. P. RYZHKOV, A. A. LUKIN, V. I. KUHAREV, A. V. RYABINKIN, T. P. KULIKOVA,
N. A. MELNIK, T. A. CHEKRYZHEVA, I. M. KRUPEN. WATER QUALITY OF THE
LAKES PADMOZERO (KARELIA) ON THE BASIS OF CONDITION OF BIOTA

Lakes of Zaonezhye Peninsula located in the Karelia Republic were not exposed to anthropogenic impact, and till now water quality is characterized with background parameters. Development of a large uranium-vanadium deposit in this area can result in change of this situation. Our data testify to fragile balance that has developed in this territory. It is established, that the structure of communities of invertebrates and fishes has not changed for last 40 years, and the content of trace elements and radionuclids in fish organism is at the lowest level and does not represent danger to their health.

Ключевые слова: качество вод, биота, фитопланктон, зоопланктон, зообентос, рыбы, микроэлементы, радионуклиды.

Водные экосистемы – одни из важнейших элементов природных систем, которые, как правило, в результате разработки полезных ископаемых являются коллекторами всех видов загрязнения промышленными отходами и их производными. Процессы трансформации при действии антропогенных факторов протекают в них гораздо активнее, чем в наземных экосистемах. На планете осталось немного мест, которые не испытывают или испытывают в незначительной мере влияние человеческой деятельности. Водоемы, расположенные на Заонежском полуострове Онежского озера (Республика Карелия), несмотря на близость к крупным промышленным центрам, по-преж-

нему остаются относительно чистыми и имеют важное практическое значение как объекты рыболовства, рыбоводства и рекреационные зоны. Удельный вес озер Заонежья и их суммарная площадь в общей системе озер Карелии незначительны – менее одного процента, но если в подсчет общей площади, занятой озерами, включить многочисленные большие заливы Онежского озера, глубоко врезавшиеся в Заонежский полуостров, то этот район можно отнести к наиболее богатым водными ресурсами областям республики. Открытие в этом районе крупного ванадиево-уранового месторождения (Средняя Падма) и предполагаемая его разработка могут изменить существующую

ситуацию и привести к трансформации водных экосистем. Поэтому исследования, связанные с оценкой их состояния, важны и актуальны.

Цель данной работы – оценить современное состояние экосистемы оз. Падмозеро в районе предполагаемого техногенеза.

Материалы и методы

Объектами исследований являлись фито-, зоопланктон, зообентос и рыбы. Полевые работы проводились в летне-осенний период 1999 г. Пробы отбирались в четырех различных районах озера.

Фитопланктон. Пробы фитопланктона (объем 1 л) отбирали батометром Рутнера на трех станциях (ст. 1 – глубина 2 м, ст. 2 – глубина 5 м, ст. 3 – глубина 14 м) с поверхности озера, консервировали йодно-формалиновым (Кузьмин, 1984) фиксатором, отфильтровывали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,95–1,02 мкм. Клетки подсчитывали в камере Нажотта объемом 0,02 мл. Биомассу водорослей рассчитывали объемно-весовым методом (Федоров, 1979) с использованием таблиц (Кузьмин, 1984). При эколого-географической характеристике фитопланктона придерживались наиболее разработанных и универсальных систем, принятых в экологии и биогеографии видов (Библиографический указатель..., 1974; Прошкина-Лавренко, 1953; Унифицированные методы..., 1977; Hustedt, 1939; Sladecsek, 1973).

Зоопланктон. Пробы зоопланктона отбирались количественной сетью Джеди (диаметр 18 см, сито № 55) фракционно по слоям (2–0, 5–2, 10–5, 14–10 м), а на мелководных станциях – процеживанием 100 л воды через качественную сеть и зафиксированы 4%-м формалином. Организмы просчитывались под микроскопом с дальнейшим пересчетом на 1 м³ воды. Пересчет средних показателей численности и биомассы производился с учетом объемов воды соответствующих горизонтов. Обработка материала проведена по общепринятой методике (Методические рекомендации..., 1984).

Макрозообентос. Для отбора макрозообентоса в литорали озера и рипали водотоков на твердых субстратах применялась ручная качественная сеть с ячейей 0,5 мм. Пробы отбирались на глубинах 0,5–1,0 м. Профундальный макрозообентос отбирался дночерпателем Экмана площадью захвата 300 см². Биомасса организмов определялась прямым взвешиванием с точностью до 0,0001 г и выражалась в граммах сырого веса в пересчете на 1 м². В зоне литорали при отборе проб использовалась качественная рамка, применявшаяся при взмучивании донного субстрата, площадью около 1 м². Кроме того, в пробу входили организмы, смытые с поверхности камней суммарной площадью примерно 0,03 м². На биотопах русловых участков также использовалась качественная рамка по аналогичной методике.

Пробы консервировались 4%-м раствором формалина.

Камеральная обработка включала разбор проб по общепринятым при исследовании макрозообентоса систематическим группам, взвешивание в сыром виде с точностью 0,0001 г. Выбор организмов из грунта проводился с использованием микроскопа МБС-9 (при увеличении 8×), в модифицированной камере Богорова, специально изготовленной для разборки бентосных проб под микроскопом. Разобраный и взвешенный материал фиксировался 70%-м этанолом.

Рыбная часть сообщества. Рыба отлавливалась стандартным набором сетей из монофиламента с размером ячеей 10; 12,5; 16; 22; 25; 30; 35; 40; 45; 52 мм, длиной 25 м и высотой 1,5 м. У выловленных рыб определялись длина, вес, пол, стадия зрелости гонад, степень наполнения желудка, жирность. На основе патолого-морфологического метода, включающего визуальную диагностику, патологоанатомический анализ, проводилась оценка состояния органов и тканей рыб (жабры, печень, почки, сердце, мышцы, скелет).

Результаты и обсуждение

Общая характеристика водоема. Озеро Падмозеро принадлежит бассейну р. Падмы и расположено в восточной части Заонежского полуострова. Площадь его – 10,1 км², наибольшая длина – 10,1 км, наибольшая ширина – 2,0 км. По форме озеро вытянуто с северо-запада на юго-восток. Длина береговой линии – 24,7 км. Объем водной массы – 0,04 км³, площадь водосбора – 100 км². В южную часть озера впадает р. Падма с объемом годового стока 16,4 млн. м³. Кроме нее в озеро впадает еще 7 ручьев. Основной сток из озера осуществляется по р. Падме, вытекающей из его северо-восточной части, коэффициент условного водообмена – 0,7–0,8. Берега преимущественно песчано-галечные (56%) и скалистые (24%). Встречаются участки чисто галечные и песчаные. Заболоченность берегов очень слабая. В целом же заболоченность бассейна составляет около 20% (Фрейндлинг, Поляков, 1965).

Цвет воды в Падмозере – светло-коричневый, цветность – 42–46 градусов, прозрачность низкая – 1,5–3,0 м. Процесс льдообразования начинается обычно в первой – второй декадах ноября, а вскрытие ото льда – в первой декаде мая. В июле поверхностные слои воды прогреваются до 23–24 °С, при средних температурах в этот период 19–20 °С. РН колеблется от 7,0 до 8,2. Газовые условия летом удовлетворительные, хотя зимой на мелководьях наблюдается дефицит кислорода (до 50%), а у дна на глубоких участках даже возникают заморные ситуации. Перманганатная окисляемость – 9,1–13,6 мг О/л, бихроматная окисляемость – 25,5–36,6 мг О/л. Содержание кислорода в

поверхностных слоях – 8,2–9,5 мг/л и у дна – 8,2–1,59 мг/л, количество углекислого газа не превышало 24,6 мг/л (Харкевич, Маслова, 1968).

Фитопланктон. Сведения о фитопланктоне оз. Падмозеро в литературе ограничиваются фрагментарными данными (Филимонова, 1965). В его составе обнаружен 81 таксон водорослей, принадлежащих к 6 систематическим отделам, в том числе *Cyanophyta* – 1, *Chrysophyta* – 12, *Bacillariophyta* – 39, *Pyrophyta* – 3, *Euglenophyta* – 3, *Chlorophyta* – 23 (прил.). Основу таксономического разнообразия растительного планктона составляли диатомовые (48%), зеленые (28%) и золотистые (15%) водоросли, что свойственно планктонной альгофлоре многих карельских водоемов и в целом озерам Северо-Запада европейской части России. Отмеченная особенность оказалась характерной для каждой станции. Число видов уменьшалось в направлении открытой части озера (табл. 11.1), но возрастали значения численности (от 1796,9 до 7834,7 тыс. кл./л) и биомассы (от 1,74 до 7,57 г/м³) фитопланктона. Наиболее существенный вклад в суммарную численность и биомассу всего фитопланктона вносили диатомовые водоросли (свыше 95%), из которых на долю *Aulacosira islandica* приходилось от 65 до 83%.

Анализ эколого-географических характеристик фитопланктона озер показал, что большинство обнаруженных таксонов относится к широко распространенным в континентальных водах. В биогеографическом отношении альгофлора представлена преимущественно космополитными формами (82%), северо-альпийских (10%) и бореальных (8%) видов немного. По отношению к солености воды большинство видов олигогалобы, наибольшая часть из которых (88%) представители индифферентов, значительно меньше галофобов (3%) и галофилов (9%). По отношению к pH индифференты составляли 57%, алкалифилы и ацидофилы соответственно 26 и 17%. Доля видов-индикаторов сапробности достигала 63% от всего состава водорослей, большинство из них олиго- (10%), олиго-β- (36%) и β-мезосапробы (52%). Основную часть в общей численности и био-

массе видов-показателей сапробности создавали массовые формы фитопланктона, среди которых преобладали индикаторы олиго- и олиго-β-мезосапробных условий, что указывает на олиго-β-мезосапробный характер вод озера и классифицирует его как умеренно загрязненный.

Таким образом, фитопланктонные сообщества обследованного озера таксономически разнообразны, а количественные показатели развития, согласно шкалам типизации водоемов (Китаев, 1984; Трифонова, 1990), свидетельствуют о значительном уровне трофии Падмозера.

Выполненные ранее (1961–1962 гг.) исследования свидетельствовали о мезотрофном статусе озера (Филимонова, 1965). К настоящему времени по уровню развития осеннего фитопланктона Падмозеро можно отнести к мезотрофному озеру с чертами эвтрофии.

Зоопланктон. Зоопланктон озера был представлен обычными для водоемов Карелии видами и не отличался большим разнообразием, что характерно для данного периода наблюдений с естественной убылью теплолюбивых форм биоценоза. В составе фауны было отмечено 28 видов, в том числе *Calanoida* – 2, *Cyclopoida* – 7, *Cladocera* – 13, *Rotatoria* – 6. Некоторое разнообразие фауны достигалось главным образом за счет босмин и представителей зарослевого комплекса на мелководных участках. Из копепоид наибольшее развитие получили *Eudiaptomus* (*E. gracilis* и *E. graciloides* в равной степени) и *Mesocyclops*, а из коловраток – *Asplanchna* (*A. priodonta*, *A. herricki*) и *Synchaeta* sp. В целом ведущими компонентами зоопланктона являлись ракообразные. Следует отметить, что существенного изменения в сторону увеличения значения копепоид, как это бывает обычно осенью, еще не произошло, и доля кладоцер в общей численности и биомассе организмов в водоеме была значительной (до 50%). Первое место среди них (более 30%) занимала *Bosmina obt. lacustris*. В роли субдоминантов выступали представители копепоид – виды, указанные выше, значение их увеличивалось (до 40%) на более глубоководных участках. Согласно исследованиям

Таблица 11.1. Количественные характеристики фитопланктона оз. Падмозеро

№ станции	Глубина, м	Горизонт, м	Отделы					Всего
			Золотистые	Диатомовые	Пирофито- вые	Эвгленовые	Зеленые	
Число видов								
1	2	0,5	6	30	1	3	19	65
2	5	0,5	4	14	0	3	10	31
3	14	0,5	5	12	2	0	6	25
Численность, тыс. кл./л								
1	2	0,5	25,0	1662	0	12	96	1796
2	5	0,5	20,0	3000	0	15	140	3175
3	14	0,5	33,2	7735	8	0	57	7834
Биомасса, г/м³								
1	2	0,5	0,02	1,64	0	0,01	0,05	1,73
2	5	0,5	0,01	2,41	0	0,03	0,03	2,49
3	14	0,5	0,04	7,44	0,06	0	0,01	7,57

Таблица 11.2. Количественные показатели зоопланктона оз. Падмозеро

№ ст.	Н	Число видов	N	В	Соотношение основных групп, %							
					Численность				Биомасса			
					Cal.	Cyc.	Cla.	Rot.	Cal.	Cyc.	Cla.	Rot.
1	14	19	5,4	0,154	25	14	44	17	37	8	45	10
2	5	14	7,1	0,253	23	19	40	18	26	7	34	33
3	0,5	18	3,9	0,135	5	30	64	0,3	6	24	69	0,1
4	2	14	5,0	0,215	18	19	58	5	14	6	38	41

Примечание. Н – глубина (м), N – численность (тыс. экз./м³), В – биомасса (г/м³); основные группы: Cal. – Calanoida, Cyc. – Cyclopoida, Cla. – Cladocera, Rot. – Rotatoria.

1961–1962 гг., оз. Падмозеро как водоем небольшой, мелководный, со значительной зоной зарослей высшей водной растительности (до 30% площади) характеризуется высокими показателями количественного развития зоопланктона и относится к типу мезотрофных. Численность и биомасса организмов, составляя на глубоководном участке (14 м) 72,7 тыс. экз./м³ и 1,4 г/м³, в зоне зарослей увеличивались соответственно до 170,0 и 4,0, а в южной части озера достигали 1 млн. экз./м³ и 20 г/м³ (Филимонова, 1965). Уровень количественного развития зоопланктона в период наших наблюдений был в целом невысок и соответствовал осеннему периоду в жизни водоема. Средняя численность бионтов составляла 5,4 тыс. экз./м³, а биомасса – 0,19 г/м³ (табл. 11.2).

Для вертикального распределения зоопланктона озера была характерна прямая стратификация – количество и биомасса изменялись от 9–10 тыс. экз./м³ и 0,2–0,38 г/м³ в поверхностном слое воды до соответственно 3,6 тыс. экз./м³ и 0,1 г/м³ – в придонном (табл. 11.3).

По качеству воды оз. Падмозеро относится к водоемам β-мезосапробного класса или умеренно (слабо) загрязненным (индекс сапробности по участкам изменялся в пределах 1,80–2,12).

Озерный макрозообентос. Первые фаунистические исследования донных беспозвоночных на оз. Падмозеро с составлением списков видового состава макрозообентоса были проведены в 1947 и далее в 1963 г. (Соколова, Гордеев, 1965).

По данным наших исследований 1999 г., в настоящее время в составе бентоценозов озера насчитывается всего 13 видов донных беспозвоночных. Отмечены представители *Oligochaeta*, *Mollusca*, *Diptera*. Наиболее разнообразна фауна *Mollusca*, представленных *Bivalvia* (*Anadonta anatina* L., *Sphaerium* sp., *Pisidium* sp., *Euglesa* sp.), *Gastropoda* (*Valvata piscinalis*, *Bithynia tentaculata* L.) и *Diptera*, из последних – семейства *Chironomidae* (*Tanytarsus* sp., *Cladotanytarsus* sp., *Micropsectra praecox*, *Corynocera ambigua*, *Chironomus* sp., *Einfeldia carbonaria*, *Cryptochironomus defectus*, *Cryptocladopelma viridula*, *Demicryptochironomus vulneratus*, *Limnochironomus nervosus*, *Endochironomus dispar*, *Polypedilum nubeculosum*, *Procladius* sp.).

Индекс видового разнообразия Шеннона (Shannon, 1948), рассчитанный с учетом фауны литоральной зоны, составил 3,03, что указывает на довольно высокий уровень биоразнообразия в донных биоценозах.

Величины численности и биомассы бентоса колебались по станциям в широких пределах – от 2033 до 267 экз./м² от 8,277 до 0,447 г/м² соответственно. Основная группа по численности – личинки *Chironomidae*, на долю которых приходится до 90%. Вместе с тем роль различных групп в формировании суммарной биомассы бентоценозов весьма значительно варьирует, так, на долю крупных (до 33 г) моллюсков *Bivalvia* (*Anadonta anatina*) на глубинах до 2,0 м приходится до 80% биомассы бентоценоза. Средняя численность для всего водоема составила 933 экз./м² при средней биомассе 3,27 г/м², а без учета *Anadonta* – всего 0,71 г/м².

В сравнении с результатами исследований, проведенных ранее (Соколова, Гордеев, 1965), видовой состав и структура сообществ макрозообентоса не претерпели существенных изменений. По трофическому статусу оз. Падмозеро можно отнести к водоемам мезотрофного, а по качеству вод – β-мезосапробного типа.

Макрозообентос р. Падмы. Известно, что осредненные для водных масс озера характеристики качества воды близки по своим значениям к характеристикам качества стока из водоема. Исходя из этого, с целью оценки экологического состояния оз. Падмозеро ниже данного водоема были собраны материалы по макрозообентосу р. Падмы.

Список обнаруженных здесь донных животных включал 26 таксонов, принадлежащих к следующим основным группам: нематоды, олигохеты, пиявки, двусторчатые и брюхоногие моллюски, водяные клещи и насекомые. Последнюю из перечисленных групп составляли представители отрядов стрекоз, веснянок, поденок, ручейников, жуков и двукрылых (табл. 11.4). Наибольшее число видов (7) отмечено для предимагинальных стадий развития

Таблица 11.3. Вертикальное распределение зоопланктона в оз. Падмозеро

Показатель	Горизонт лова, м			
	2–0	5–2	10–5	14–10
Численность, тыс. экз./м³	9,1	7,3	4,2	3,6
Биомасса, г/м³	0,21	0,23	0,13	0,10

Таблица 11.4. Таксономический состав макрозообентоса р. Падмы

Nematoda	<i>Heptagenia sulfurea</i> (O. F. Mul.)
Oligochaeta	Trichoptera
Hirudinea	<i>Rhyacophila nubila</i> Zet.
<i>Haemopsis sanguisuga</i> (L.)	<i>Hydropsyche angustipennis</i> Curt.
Bivalvia	<i>Psychomyia pusilla</i> (Fabr.)
<i>Pisidium</i> sp.	<i>Apatania muliebris</i> Mc. Lach.
Gastropoda	<i>Lasiocephala basalis</i> (Kolen)
<i>Limnaea glarba</i> (O. F. Mul.)	<i>Polycentropus flavomaculatus</i> (Pict.)
<i>Acroloxus lacustris</i> L.	<i>Lepidostoma hirtum</i> (Fabr.)
Hydracarina	Coleoptera
Odonata	<i>Helmis</i> sp.
<i>Somatochlora aenea</i> (L.)	<i>Latelmis volckmari</i> Panz.
Plecoptera	Diptera
<i>Taeniopteryx nebulosa</i> L.	<i>Tipula</i> sp.
<i>Isoperla difformis</i> Klap.	<i>Limnophora riparia</i> (Fall.)
Ephemeroptera	<i>Dicranota</i> sp.
<i>Baetis vernus</i> (Curt.)	<i>Chironomidae</i> sp. sp.
<i>Paraleptophlebia cincta</i> (Redz.)	

ручейников. В целом на долю насекомых пришлось более 70% от числа всех видов.

Доминирующими по численности группами донных животных являлись поденки и ручейники, по биомассе (без учета 2 экземпляров крупных пиявок) – ручейники и стрекозы (табл. 11.5). Достаточно высокое таксономическое разнообразие фауны макробентоса реки, преобладание здесь представителей класса насекомых, присутствие личинок таких организмов, как *I. difformis*, *P. flavomaculatus*, *Rh. nubila*, *Helmidae*, свидетельствует об отсутствии значительного негативного воздействия на водосбор р. Падмы, включая оз. Падмозеро. Однако невысокая доля организмов-индикаторов олиготрофных и олигосапробных условий, доминирование среди поденок *B. vernus*, среди ручейников – *H. angustipennis* указывают на обогащение воды органическими веществами антропогенного или автохтонного происхождения, т.е. на загрязнение или повышенный трофический статус оз. Падмозеро.

Таблица 11.5. Значения относительной численности (N, тыс. экз./м²) и биомассы (B, г/м²) основных групп макрозообентоса р. Падмы (октябрь, 1999 г.)

Группа	N	B	Группа	N	B
Nematoda	0,64	0,03	Plecoptera	3,21	0,19
Oligochaeta	3,85	0,11	Ephemeroptera	45,5	3,30
Hirudinea	1,28	66,34	Trichoptera	20,5	12,00
Bivalvia	5,77	0,19	Coleoptera	8,97	0,40
Gastropoda	2,56	3,46	Chironomidae	2,56	0,13
Odonata	1,28	10,35	Diptera var.	3,85	3,52

Для решения вопроса о генезисе органики использована система Вудивисса (Woodiwiss, 1964), модифицированная для применения в условиях рек Карелии (Кухарев, 1991). Известно, что значения индекса, получаемого по данной системе биоиндикации (ИБ), отражают различные типы загрязнения водотоков и, в первую очередь, антропогенную нагрузку лег-

ко окисляемых органических веществ. Величина ИБ для обследованного участка р. Падмы составила 10, указывая на отсутствие загрязнения и преобладание в воде реки автохтонной органики, т.е. на повышенный трофический статус водоема.

Таким образом, из полученных данных следует, что сообщество макрозообентоса р. Падмы активно, хорошо развито, находится в устойчивом состоянии. Это свидетельствует об отсутствии чрезмерной антропогенной нагрузки на экосистему реки, включая оз. Падмозеро, трофические условия которого соответствуют мезосапробным.

Ихтиофауна. По данным Е. Ф. Макаровой (1959), ихтиофауна оз. Падмозеро состоит из восьми видов рыб: обыкновенная щука *Esox lucius* L., лещ *Abramis brama* L., уклейка *Alburnus alburnus* L., плотва *Rutilus rutilus* L., обыкновенный налим *Lota lota* (L.), колюшка трехиглая обыкновенная *Gasterosteus aculeatus* L., обыкновенный ерш *Cymnocephalus cernuus* (L.), речной окунь *Perca fluviatilis* (L.). Преобладали в опытных уловах того времени плотва и окунь, достаточно многочисленны также были щука, лещ, ерш, уклейка, налим. По данным М. В. Балагуровой с соавторами (1965), численный состав ихтиофауны в опытных уловах в 1963 г. был представлен окунем, плотвой и уклейкой. В весовом отношении состав опытных уловов характеризовался преобладанием щуки (табл. 11.6). Для увеличения доли планктонофагов в это же время были даны рекомендации для вселения в оз. Падмозеро пеляди и крупной ряпушки (Материалы СевНИИРХ, 1968). Целесообразность вселения крупной ряпушки сохраняется до настоящего времени. Вселение же пеляди потребует постоянного поддержания ее численности путем воспроизводства ее в искусственных условиях.

Таблица 11.6. Процентное соотношение различных видов рыб в опытных уловах (Балагурова и др., 1965)

Вид рыбы	% в улове	
	по количеству	по весу
Плотва	30,4	12,0
Окунь	31,35	19,5
Щука	5,33	51,6
Лещ	9,4	12,0
Уклейка	23,2	4,9
Ерш	0,32	0,01

По результатам наших исследований, выполненных в 1999, 2003 и 2004 гг. и опросу местных рыбаков, видовой состав ихтиофауны оз. Падмозеро не претерпел существенных изменений. По-прежнему массовыми видами остаются окунь и плотва. Сохранил свое численное преобладание лещ.

Наиболее многочисленны были опытные уловы в 2004 г. Всего было отловлено 205 экз. рыб. Среди них самок – 140 экз. (68,3%) и самцов – 65 экз. (31,7%). В уловах соотношение

полов различается у разных видов. У леща величина этого соотношения равняется – 1,6 : 1, у плотвы – 2,6 : 1, у окуня – 2,1 : 1, у ерша – 5 : 1 (табл. 11.7). Аналогичное соотношение полов наблюдалось в 1999 и 2003 гг. Следует обратить особое внимание на сложившуюся половую структуру как сообщества рыб в целом, так и в отдельных его популяциях. Соотношение полов в исследованных популяциях рыб (окунь, лещ, плотва) обычно приближается к 1 : 1. Известно, что в таких случаях преобладание самок над самцами в популяциях является следствием негативных изменений в водной экосистеме (Никольский, 1974).

Таблица 11.7. Состав рыб в уловах на оз. Падмозеро (август, 2004 г.)

Вид	n	♀		♂	
		n	%	n	%
Лещ	59	36	61	23	39
Плотва	65	47	72	18	28
Окунь	68	46	68	22	32
Ерш	12	10	83	2	17
Налим	1	1	–	–	–
Всего	205	140	–	65	–

Ниже представлена краткая характеристика биологических особенностей численно преобладающих видов рыб оз. Падмозеро.

Лещ. В Падмозере лещ распространен по всей акватории озера, в основном до глубины 10–15 м с песчаными и глинистыми грунтами (в оз. Падмозеро максимальная глубина – 14,9 м, средняя – 3,5 м). Становится половозрелым в возрасте 5–7 лет. Нерестится в июне при температуре воды 13–18 °С на мелководьях (менее 1 м) в зарослях водной растительности. Плодовитость достигает до 300 тыс. икринок. Хорошо развитая в озере водная растительность создает благоприятные условия для нереста и нагула молоди леща. Молодь питается зоопланктоном. Взрослый лещ – типичный бентофаг (личинки насекомых, моллюски, черви, донные ракообразные).

В опытных уловах в августе 2004 г. возрастной состав леща был от 3+ до 12+ лет (табл. 11.8). Количественно преобладали особи в возрасте от 3+ до 6+. Рыбы в возрасте 7+, 8+ и 12+ лет встречались редко. Максимальный вес леща составил 336,4 г при длине тела 34,2 см (12+), минимальный вес – 25,3 г при длине 11,8 см (3+). По опросу местных рыбаков во второй декаде июня в озере нередко вылавливают лещей весом до 2,5 кг.

Таблица 11.8. Размерно-весовой и половой состав леща оз. Падмозеро (август, 2004 г.)

	3+	4+	5+	6+	7+	8+	12+
Р, г	25,3	36,6	59,4	93,5	121,9	174,1	336,4
Л, см	11,8	15,0	15,8	16,7	18,2	25,3	34,2
n	10	11	17	12	6	2	1

Если сравнить динамику роста леща, отловленного в 2004 г., с одновозрастными рыбами, выловленными в 1999 г., то у половозрелых рыб можно отметить некоторое снижение темпа роста. Так, рыбы в возрасте 6+ в 1999 г. в среднем весили 105,0 г при длине тела 16,9 см, в возрасте 7+ – 143,0 г и 20,1 см. У аналогичных рыб из уловов 2004 г. вес был 93,5 г и длина – 16,7 см (6+) и 121,9 г и 18,2 см (7+) соответственно. У некоторых групп неполовозрелого леща наблюдалось обратное соотношение. В возрасте 4+ средний вес лещей из уловов 1999 г. был 32 г и длина тела 12,1 см, а в 2004 г. соответственно 36,6 г и 15,0 см, в возрасте 5+ соответственно 57,4 г и 11,8 см и в 2004 г. – 59,4 г и 15,8 см.

По сравнению с 1960-ми годами темп роста леща оказался замедленным. По данным М. Н. Балагуровой с соавторами (1965), в 1963 г. ими были отловлены рыбы в возрасте 5+ максимальным весом 77 г при длине тела 14,6 см, в возрасте 6+ – 110,0 г и 18,1 см и в возрасте 7+ – 203,0 г и 22,0 см (соответственно). Весовые показатели у леща тех лет были в 1,2–1,7 раза выше по сравнению с современными одновозрастными группами рыб. Следует отметить, что уже в то время падмозерский лещ отличался замедленным ростом по сравнению с рыбами этого же вида из Онежского озера, Сямозера, Лакшозера, Вагатозера и других озер Карелии. Одной из причин медленного роста леща может быть напряженное состояние отдельных гидрохимических показателей водной среды и его кормовой базы.

Плотва населяет преимущественно мелководье с богатой водной растительностью. Она не слишком требовательна к условиям среды обитания, способна переносить большие колебания газового, химического и температурного режимов. Самцы созревают в возрасте 3 лет, самки – 4–5. Нерестится в мае – июне при температуре воды 8–9 °С. Нерест обычно проходит в прибрежной зоне среди остатков водной растительности. Плодовитость колеблется от 2,5 до 100 тыс. икринок (в зависимости от возраста и размеров). Взрослые рыбы питаются беспозвоночными и их личинками, а также при недостатке основной пищи икрой. Летом в рацион плотвы входят нитчатые водоросли и мягкие части высших водных растений. В отдельных случаях плотва может быть пищевым конкурентом леща.

В опытных уловах 2004 г. плотва представлена достаточно широким диапазоном возрастных групп (3+ – 13+). Масса тела плотвы в этих возрастных группах колебалась от 11,0 до 130,7 г, длина – от 6,8 до 24,3 см. Прирост ее биомассы составил в исследованном возрастном ряду 119,7 г и общей длины – 17,5 см. Несмотря на то что рост плотвы в основном замедлен (табл. 11.9) по сравнению с рыбами из уловов 1999 г., в половозрелом возрасте он оказался несколько интенсивнее. Так, в 1999 г.

у рыб в возрасте 5+ средний вес был 16,4 г, в 2004 г. 19,4 г. Соответственно их размеры были 9,2 см и 11,4 см. В возрасте 6+ эти показатели соответственно равнялись 22,3 г и 27,3 г и 10,6 см и 12,2 см и т. д. Вероятно, такая динамика роста является следствием сложных пищевых взаимоотношений с лещом, но сила этих взаимоотношений такова, что позволяет совместно существовать этим двум видам и находить оптимальные условия для нереста, нагула и роста.

Если сравнить исследованные размерно-весовые показатели плотвы с аналогичными материалами 1960-х годов, то в целом их изменения весьма незначительны. Преобладание темпа роста можно отметить лишь у современных рыб в период полового созревания. Например, по данным М. Н. Балагуровой с соавторами (1965), в 1960-е годы падмозерская плотва в возрасте 4+ имела средний вес 11,3 г и среднюю длину 9,9 см, в возрасте 5+ – 13,8 г и 9,6 см и в возрасте 6+ – 20,9 г и 10,8 см. Соответственно размерно-весовые показатели плотвы в современных условиях были 16,5 г и 10,6 см, 19,4 г и 11,4 см, 27,3 г и 14,6 см. Такое соотношение размерно-весовых показателей является еще одним свидетельством продолжающейся эвтрофикации водоема.

Окунь – широко распространенный вид. В малых водоемах приспособлен к жизни в прибрежной зарослевой зоне. Однако может обитать и на глубине (особенно в больших озерах) с богатой и разнообразной кормовой базой. «Глубинный» (крупный) окунь становится половозрелым в возрасте 4+ – 5+, мелкий («прибрежный») – в возрасте 2+ – 3+. Нерестится окунь в конце мая – начале июня при температуре воды 7–8 °С, откладывая икру на растительности в виде длинных лент. Плодовитость его колеблется от 10 до 100 тыс. икринок (в зависимости от возраста и массы тела). Окунь мелкой, или береговой, формы питается зоопланктоном, бентосом и молодью разных видов рыб, глубинный окунь во взрослом состоянии чаще всего хищник.

В опытных уловах 2004 г. были представлены возрастные группы 3+ – 9+ (табл. 11.10). Вес окуня изменялся в пределах от 20,6 до 170,2 г, длина – от 9,8 до 28,0 см.

Если сравнить данные о размерно-весовых показателях окуня 2004 г. с материалами 1999 г., то существенных различий в темпе его роста не наблюдается (табл. 11.10). Некоторые колебания названных показателей в 1999 и 2004 гг. могут быть обусловлены отловом рыб в разные сезоны года и в различных участках озера. В целом же темп роста окуня в последние годы можно считать удовлетворительным. Например, в 1999 г. в возрасте 4+ средний вес окуня был 36,0 г, в 2004 г. этот показатель равнялся 31,0 г. Соответственно линейные размеры были 14,0 см и 15,4 см. В возрасте 5+ динамика данных показателей следующая: 57,0 г и 55,3 г и 17,0 см и 17,5 см, в возрасте 6+ – 88,0 г и 70,2 г и 21,0 см и 18,1 см, в возрасте 7+ – 157,0 г и 133,0 г и 23,0 см и 20,6 см и т. д. Общая динамика этих показателей может быть также обусловлена неодинаковым характером питания и связанным с ним соотношением линейного и весового роста. Конечно, на динамике линейного и весового роста могут сказываться климатические особенности каждого календарного года. Однако эта проблема требует специальных исследований, которые предполагается выполнить в последующие годы.

Таким образом, ядро рыбного сообщества складывается в настоящее время в основном тремя видами рыб: лещом, окунем и плотвой. По сравнению с 1961 г. произошло снижение размерно-весовых показателей, что может быть связано с промысловой нагрузкой на водоем. По словам местного жителя, в зимне-весенний период 1996–1997 гг. на озере велся интенсивный лов рыбы. Обращает внимание значительное преобладание самок в популяциях окуня и плотвы. Такое доминирование самок обычно в популяциях, находящихся в состоянии стресса (Никольский, 1974).

Патологоанатомический анализ. У всех обследованных рыб тело чистое, без видимых нарушений в чешуйном покрове. Окраска четкая,

Таблица 11.10. Размерно-весовой состав окуня оз. Падмозеро

	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	15+
1999 г.										
P, г	7,0	13,5	36	57	88,0	157,0	196	197,0	241	743
L, см	10,0	11,5	14,0	17,0	21,0	23,0	24,2	26,5	28,0	39
n	2	2	5	4	9	14	8	9	3	1
2004 г.										
P, г		20,6	31,0	55,3	70,2	133,8	143,4	170,2	–	–
L, см		9,8	15,4	17,5	18,1	20,6	23,7	28,0	–	–
n	–	9	18	8	12	13	3	5	–	–

яркая без признаков депигментации, плавниковая кайма и лучи плавников целые, без надразов и оплавленностей. Случаев гиперимии, подкожных кровоизлияний или язв, гидремии тела не наблюдалось. Деформации костей черепа и ярко выраженных случаев сколиозов не наблюдалось. У 2 экз. плотвы диагностированы сращения позвонков (начальная стадия сколиоза). На жабрах у 5 экз. леща, 6 экз. плотвы и 3 экз. окуня на жабрах отмечено «анемичное» кольцо, белесоватый ободок – характерный признак низкого гемоглобина.

Мышечный тургор всех исследованных рыб удовлетворительный. Наличие экссудата в брюшной полости не отмечено. Внутренние органы (печень, почка, гонады, селезенка, сердце, желудок, кишечник) топографически расположены правильно. У 2 экз. плотвы отмечена атрофия печени, имеющей тонкие длинные дополнительные выросты с крупными увеличенными сосудами. В целом состояние обследованных рыб можно оценить как удовлетворительное. У 3 экз. леща наблюдался сильный лигулез.

Микроэлементы в органах и тканях рыб. Содержание тяжелых металлов и алюминия определялось в органах и тканях четырех видов рыб: плотва (фитопланктофаг); лещ (бентофаг); окунь (эврифаг) и щука (хищник) (табл. 11.11).

Аккумуляция металлов в живых организмах зависит от многих факторов: свойств самих металлов (биофильности); видовой принадлежности; возраста и физиологического состояния организма, типа питания, а также от условий среды, в которой формируется доза воздействия, в водных системах – это ионный состав, pH, характер грунта и проточность. Полученные данные свидетельствуют о том, что для рыб Падмозера характерна не только видовая специфика накопления металлов, но и различное их распределение в органах и тканях. В табл. 11.11 отсутствуют данные по мышьяку

и ванадию. Содержание этих элементов в органах и тканях всех рыб было крайне низким, за пределами регистрации применяемыми методами. Отсутствие данных по содержанию химических элементов в рыбах озер Заонежья заставило нас сопоставлять полученные результаты с рыбами из озер Кольского полуострова, где подобные исследования проводятся более 30 лет. Так как общим видом в исследованных водоемах является щука, эти сравнения приводятся для этого вида, взятого из относительно не загрязненного района Кольского полуострова (юго-восток, оз. Бабье).

Цинк. У рыб Падмозера концентрации цинка показывали высокую вариабельность. Этот металл накапливается в наибольших абсолютных количествах по сравнению с другими определяемыми металлами. Наиболее высокие концентрации цинка обнаружены в жабрах и почке рыб. Причем соотношение содержания цинка в различных органах сильно меняется у различных видов и у рыб одного вида, но обитающих в разных водоемах (Кашулин и др., 1999). Во всех случаях наименьшие концентрации цинка были обнаружены в мышцах.

Концентрации цинка в рыбах Падмозера превышает его содержание у рыб Кольского полуострова, но основные закономерности накопления и распределения по органам и тканям сохраняются (рис. 11.1).

Никель. Концентрации никеля у щук Падмозера сопоставимы или превосходят таковые в водоемах Кольского полуострова (рис. 11.2.). Поэтому было интересно сравнить его содержание в падмозерских рыбах с содержанием в рыбах из озер Кольского полуострова, где никель – один из приоритетных загрязнителей водных экосистем. Т. И. Моисеенко (1997) была установлена достоверная корреляция между содержанием никеля в воде, жабрах, коже и почке рыб. В районах загрязнения никелем наиболее часто встречаемая патология рыб – почечно-каменная болезнь. Зависимость

Таблица 11.11. Концентрации микроэлементов в органах и тканях рыб, мкг/г сух. веса

Вид	Орган	Zn	Cu	Ni	Cr	Co	Mn	Cd	Hg	Pb	Al	Sr
Окунь	Жабры	74	1,28	1,10	0,24	0,04	25,8	0,35	Не опр.	0,16	53,4	20,6
	Печень	103	5,22	0,19	0,05	0,34	15,9	0,50	0,24	0,27	5,45	0,74
	Скелет	117	1,11	1,08	0,14	0,02	20,4	0,23	0,08	0,17	16,7	25,2
	Мышцы	23	1,46	0,25	0,03	0,02	1,71	0,01	0,26	Не опр.	4,67	0,53
Плотва	Жабры	511	1,80	1,09	0,08	0,05	34,7	0,34	Не опр.	0,33	8,04	43,4
	Печень	151	13,8	1,39	0,03	1,10	8,53	2,97	0,04	1,09	7,71	1,13
	Почка	989	8,15	4,89	0,15	0,40	6,70	0,80	Не опр.	1,17	13,2	4,15
	Скелет	213	0,83	0,58	0,09	0,06	30,6	0,58	"	Не опр.	9,22	44,5
Лещ	Мышцы	29	1,45	0,09	0,05	0,02	3,53	Не опр.	0,10	0,01	9,57	1,64
	Жабры	82	1,94	0,60	0,20	0,05	148	0,25	Не опр.	0,14	15,3	55,1
	Печень	107	33,5	0,44	0,06	0,14	7,55	0,33	"	0,74	8,24	0,82
	Почка	105	4,62	0,04	0,04	0,52	4,32	2,05	"	1,52	1,31	2,18
Щука	Скелет	97	0,85	0,25	0,08	0,05	141	0,52	"	0,40	7,41	62,3
	Мышцы	15	1,68	0,43	0,04	0,01	15,7	0,01	"	0,05	7,57	2,50
	Жабры	349	1,55	1,01	0,09	Не опр.	45,4	0,32	0,03	Не опр.	8,95	26,8
	Печень	157	11,7	0,12	0,03	0,05	15,2	0,15	0,23	"	3,22	0,32
Щука	Почка	434	5,52	0,20	0,11	0,40	4,81	0,58	0,16	"	13,1	0,58
	Скелет	145	0,56	1,29	0,05	Не опр.	45,8	0,24	0,10	"	8,66	33,2
	Мышцы	24	1,14	0,32	0,02	0,01	1,87	Не опр.	0,25	"	4,10	0,56

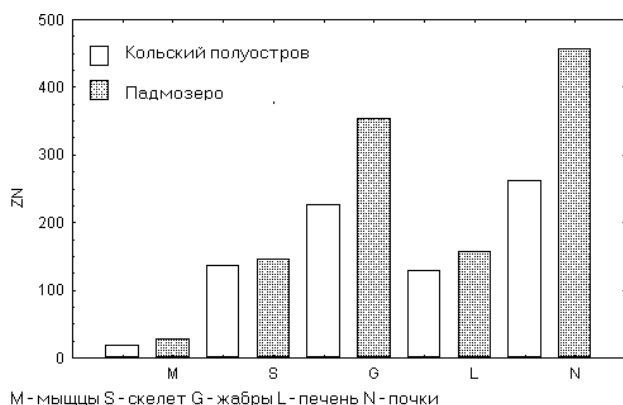


Рис. 11.1. Содержание цинка у щук Падмозера и Кольского полуострова

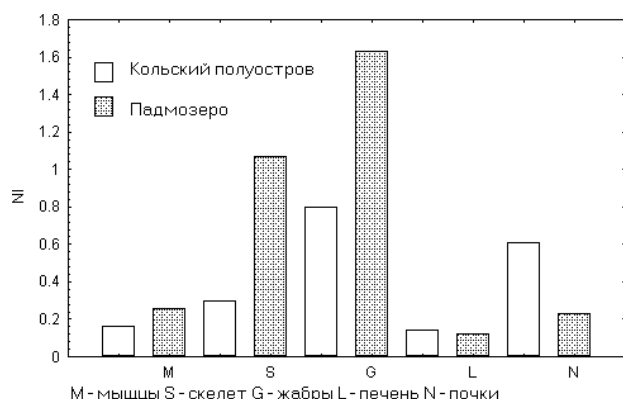


Рис. 11.2. Содержание никеля у щук Падмозера и Кольского полуострова

между интенсивностью развития почечно-каменной болезни и содержанием никеля в воде описывается уравнением регрессии (Моисеенко, Яковлев, 1990):

$$I_{п.-к.} = -0,32 + 0,28 \times C_{Ni} \text{ в почке.}$$

Однако содержание никеля в органах и тканях щук Падмозера значительно ниже, чем в очагах загрязнения на Кольском полуострове, и, судя по всему, подобные концентрации никеля у рыб Падмозера являются нормой. У разных видов рыб никель накапливается в различных органах неодинаково (табл. 11.11). Как правило, для всех видов рыб характерно высокое содержание никеля в почке и жабрах и незначительное – в мышцах.

Медь. Содержание и распределение меди в организме исследованных рыб в разных органах варьирует довольно значительно (табл. 11.11, рис. 11.3). Эта вариабельность наиболее выражена для печени и почек – органов, отвечающих за гомеостаз и выведение этого элемента.

Медь накапливается в организме рыб в больших абсолютных количествах по сравнению с никелем. Это свидетельствует о более интенсивном ее метаболизме в организме рыб по сравнению с никелем, что подтверждается и литературными данными (Sorensen, 1992).

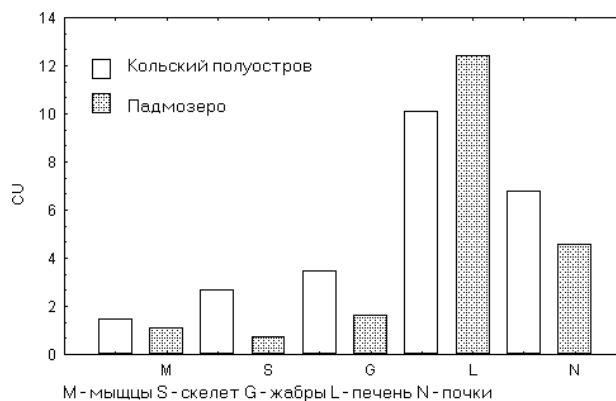


Рис. 11.3. Содержание меди у щук Падмозера и Кольского полуострова

Сравнение концентраций меди в органах и тканях щук показывает, что у щук Падмозера этот элемент больше накапливается в печени. В почках, жабрах и скелете он несколько преобладает у рыб Кольского полуострова (рис. 11.3). Больше всего меди обычно содержится в печени рыб, что хорошо подтверждается полученными данными (табл. 11.11).

Марганец. По литературным данным, содержание марганца у рыб Кольского полуострова, как правило, специфично для каждого водоема (Лукин, Кашулин, 1991). Эта специфичность также характерна и для рыб Падмозера. В наибольших концентрациях этот металл откладывается в почках, жабрах и скелете, в наименьших – в мышцах (табл. 11.11).

Алюминий. Содержание его в воде, донных отложениях Падмозера довольно высокое, но его концентрации в органах и тканях щук Падмозера значительно ниже, чем у рыб Кольского полуострова (рис. 11.4), что свидетельствует о его закомплексованности и низком содержании лабильных форм алюминия в Падмозере. Уровни накопления этого металла наиболее высоки в жабрах (табл. 11.11). Содержание Al в других органах и тканях варьирует у разных видов рыб.

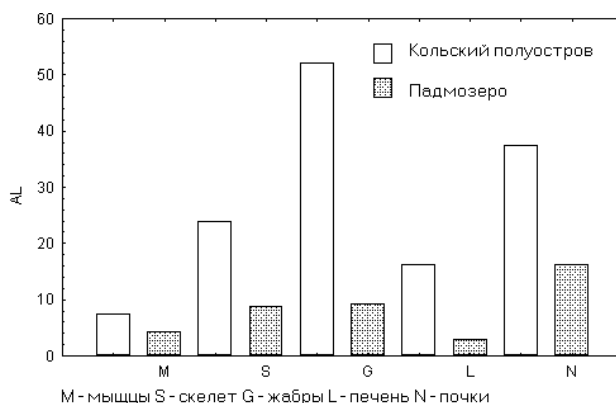


Рис. 11.4. Содержание алюминия у щук Падмозера и Кольского полуострова

Содержание остальных микроэлементов было довольно низким и не представляет опасности для здоровья рыб (табл. 11.11).

Радионуклиды в воде, донных отложениях и рыбах. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» (1996), «Нормы радиационной безопасности (НРБ-96)» (1988, 1996) и Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96, СанПиН 2.1.4.559-96 (1996) предъявляют жесткие требования к определению радионуклидов в строительных материалах, удобрениях, пищевых продуктах, воде и в других объектах. Проблема радиационного контроля объектов природной среды является всегда актуальной в связи с нормированием содержания радионуклидов в пищевых продуктах и в лекарственном сырье, так как повышенное содержание их может быть причиной нарастания дозы внутреннего облучения населения и увеличения радиационного фона местности. Радиационная обстановка, формирующаяся в том или ином регионе, обычно обусловлена соответствующими радионуклидами и оценивается на основании результатов фактических наблюдений в интересующем районе.

Результаты исследований показали, что все анализируемые продукты содержат кларковые количества естественных радионуклидов рядов урана и тория, калий-40 за счет естественного извлечения их из почвы и подземных вод. Погрешность определения для $P = 0,95$ была равна 40–60 отн. % при определении K-40, Ra-226, Th-232, Cs-137 в твердых продуктах. Такой уровень погрешности обусловлен низкими концентрациями радионуклидов в исследуемых объектах и относительно небольшой величиной навески пробы, взятой на анализ, – 0,015–0,03 кг (сырая масса). Но даже с учетом этой погрешности видно, что удельная радиоактивность естественных радионуклидов в природных объектах имеет низкие значения, концентрации урана и тория находятся на уровне $<(10^{-3}–10^{-4})$ мас. %. Погрешность определения альфа-, бета-активных веществ в сухих остатках проб была равна 10–25% (табл. 11.12).

Таблица 11.12. Удельная радиоактивность природных объектов (средние значения результатов, расчет на сырую массу)

Наименование пробы	Удельная радиоактивность, Бк/кг		Содержание радионуклидов, мас. % (г/л)		
	α -	β -	уран, $\cdot 10^{-4}$	торий, $\cdot 10^{-4}$	радий, $\cdot 10^{-11}$
Почва-дерн	Отсут.	291,18	8,00	16,7	27,2
Донные отложения	115,89	162,94	1,60	2,46	5,45
Вода, ст. 1	87,02	151,77	9,60	9,58	32,6
Вода, ст. 2	75,78	148,79	6,24	17,9	21,2
Вода, ст. 3	97,35	175,45	10,4	12,3	35,3
Окунь	222,74	366,61	2,24	3,44	7,61
Щука	74,26	181,69	0,57	1,97	1,93
Плотва	111,19	238,57	1,20	1,33	4,08
Лещ	137,16	284,91	1,52	1,47	5,17

Примечание. Пробы воды – содержание радионуклидов в г/л.

Установлено, что мощность экспозиционной дозы (МЭД) на поверхности исследуемых образцов равна 15–20 мкР/ч (фон – 10–15 мкР/ч), т. е. находится на уровне фоновых значений, и они не представляют опасности внешнего облучения для населения.

Удельная радиоактивность альфа-, бета-активных веществ в исследуемых объектах соответственно равна 0–223 Бк/кг, 149–367 Бк/кг (табл. 11.12), что примерно на порядок меньше нормируемых величин, установленных для соответствующего вида излучения. Отношение $\alpha : \beta = 0,51$ для воды, 0,45 – для рыб, 0,71 – для донных отложений, т. е. во всех случаях преобладает содержание бета-активности. Причем 50–80% этой радиоактивности приходится на калий-40, который является постоянной составной частью всех природных смесей изотопов калия содержится 0,0118 мас. % K-40. Согласно НРБ-96 и ОСП-72/87, все исследуемые продукты не радиоактивны.

В исследуемых продуктах техногенные радионуклиды, кроме цезия-137, отсутствуют. Содержание цезия-137 в биотах оз. Падмозеро (воде, рыбе) находится на уровне 3–6 Бк/кг. Согласно требованиям действующих нормативных документов по радиационной безопасности, предъявляемым к открытым водоемам и пищевым продуктам, удельная радиоактивность по Cs-137 меньше ПДК_в для населения (<130 Бк/кг для рыбы-сырца и 96 Бк/кг для открытых водоемов) (Нормы..., 1988, 1996; Временные допустимые уровни..., 1993; Гигиенические требования..., 1997).

Средние содержания ЕРН в рыбах равны: ^{238}U – $<13,7$ Бк/кг, ^{232}Th – $<6,5–8,4$ Бк/кг, ^{226}Ra – $<13,7–17,3$ Бк/кг, ^{40}K – 72,6 Бк/кг. Содержание урана и тория у окуня в 1,5–2 раза выше, чем в других видах рыб. Минимальное содержание ЕРН обнаружено в щуке. Специфические места фиксации радионуклидов не выявлены. Отношения концентраций радия-226 и тория-232 в рыбе и воде равны 1,2–1,6, т. е. накопление радионуклидов в рыбах меньше, чем в донных отложениях.

Заключение

Гидробиологические исследования озера показали, что к настоящему времени по уровню развития осеннего фитопланктона Падмозеро можно отнести к мезотрофному озеру с чертами эвтрофии. Видовой состав и структура сообществ зоопланктона и макрозообентоса не претерпели существенных изменений. По трофическому статусу оз. Падмозеро можно отнести к водоемам мезотрофного, а по качеству вод – β -мезосапробного типа. Сообщество макрозообентоса активно, хорошо развито и находится в устойчивом состоянии. Это свидетельствует об отсутствии чрезмерной антропогенной нагрузки на экосистему р. Падмы и

оз. Падмозеро, трофические условия которого соответствуют мезосапробным.

Ихтиофауна оз. Падмозеро не изменилась за последние 40 лет. Доминирующими видами по-прежнему являются плотва, окунь, лещ. Однако за последние годы размерно-весовые показатели рыб существенно снизились, что в первую очередь объясняется интенсивным выловом рыбы.

Анализ содержания микроэлементов в органах и тканях рыб показал специфичность их распределения в зависимости от вида. Однако концентрации большинства микроэлементов не представляют опасности для здоровья рыб. Отсутствие подобного рода исследований по Карелии заставляет обратить пристальное внимание на полученные данные, и, возможно, дальнейшие исследования позволят сопоставить и оценить степень воздействия микроэлементов на организм рыб и определиться с понятием «норма».

Радиационно-экологическая оценка образцов природной среды из района уран-ванадиевого месторождения (оз. Падмозеро) показала, что МЭД образцов находится на уровне фоновых значений. Удельная радиоактивность альфа-, бета-активных веществ в рассматриваемых объектах не превышает нормированные значения для соответствующего вида излучения. В исследуемых продуктах техногенные радионуклиды, кроме цезия-137, отсутствуют. В настоящее время в районе оз. Падмозеро сложилось достаточно хрупкое равновесие между содержащимися в почве естественными радионуклидами семейства урана-238 и его содержанием в воде, грунте, донных отложениях и гидробионтах. Постепенное воздействие радионуклидов на окружающую среду в изучаемом регионе складывалось десятками тысяч лет. Разработка месторождения может нарушить это хрупкое равновесие в связи с дополнительным поступлением радионуклидов в водоемы, поэтому необходим мониторинг состояния окружающей среды этого района, хотя бы на уровне оценки состояния радионуклидов в почве, воде и рыбах, чтобы определить, накапливаются ли радионуклиды в гидробионтах или между ними установилось естественное равновесие.

Литература

- Балагурова М. В., Кожина Е. С., Потапова О. И., 1965. Некоторые данные по биологии промысловых рыб Путкозеро и Падмозеро // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 164–180.
- Библиографический указатель по теме: «Биологический указатель качества вод» с приложением списка организмов-индикаторов загрязнения, 1974 / Составлен А. В. Макрушиным. Л. 53 с.
- Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-134,-137 и стронция-90 в пищевых продуктах. ГН 2.6.005-93, 1993. М.: Госкомсанэпиднадзор РФ. 4 с.
- Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.560-96, 1997. М.: Госкомсанэпиднадзор РФ. 270 с.
- Кашулин Н. А., Лукин А. А., Амундсен П.-А., 1999. Рыбы пресных вод субарктики как биоиндикаторы техногенного загрязнения. Апатиты: Кольский НЦ РАН. 142 с.
- Китаев С. П., 1984. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М. 207 с.
- Кузьмин Г. В., 1984. Таблицы для вычисления биомассы водорослей. Магадан. С. 47.
- Кухарев В. И., 1991. Сообщества макрозообентоса как индикаторы качества вод малых рек Карелии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л. 29 с.
- Лукин А. А., Кашулин Н. А., 1991. Состояние ихтиофауны водоемов в приграничной зоне СССР и Норвегии. Апатиты: Кольский НЦ РАН. 51 с.
- Макарова Е. Ф., 1959. Озеро Падмозеро // Озера Карелии. Петрозаводск. 152 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов в гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция, 1984. Л. 33 с.
- Моисеенко Т. И., 1997. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: Кольский НЦ РАН. 260 с.
- Моисеенко Т. И., Яковлев В. А., 1990. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука. 219 с.
- Никольский Г. В., 1974. Теория динамики стада промысловых рыб. М.: Пищ. пром-сть. 342 с.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-76/87) и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений (ОСП-72/87), 1988. М.: Энергоатомиздат. 160 с.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96, 1996. М.: Информ.-изд. центр Госкомсанэпиднадзора России. 127 с.
- Прошкина-Лавренко А. И., 1953. Диатомовые водоросли – показатели солености воды // Диатомовый сборник. Л. С. 186–205.
- Соколова В. А., Гордеев О. Н., 1965. Донная фауна озера Заонежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 180–195.
- Трифорова И. С., 1990. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука. 184 с.
- Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. III. Методы биологического анализа вод. Атлас сапробных организмов, 1977. М. 227 с.
- Федоров В. Д., 1979. О методах изучения фитопланктона и его активности. М. 166 с.
- Филимонова З. И., 1965. Зоопланктон озер Заонежья // Вопросы гидрологии, озероведения и водного хозяйства Карелии. Вып. XXIII. Петрозаводск. С. 212–235.
- Фрейндлинг В. А., Поляков Ю. К., 1965. Морфология и гидрология озер Заонежья // Там же. С. 61–79.
- Харкевич Н. С., Маслова Н. П., 1968. О гидрохимии озер Заонежья // Тр. Карельского отд. ГосНИОРХ. Т. V, вып. 1. С. 66–70.
- Hustedt F., 1939. Systematische und ökologische untersuchungen über die diatomeenflora von Jova, Bali und Sumatra // Arch. Hydrobiol. Suppl.
- Shannon C. E., 1948. A mathematical theory of communication // Bell System Techn. J. 27. P. 379–423, 623–656.

Sladeczek V., 1973. System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol. 7. P. 1–128.
 Sorensen E. M., 1992. Metal poisoning in fish U.S.A. Texas: CRC Press. 362 p.

Woodiwiss F. S., 1964. The biological sistem of stream classification used by Trent River Board // Chemistry and Industry. V. 11. P. 443–447.

Приложение

Таксономический состав фитопланктона Падмозера

Цyanophyta

Aphanothece clathrata f. clathrata W. et G. West.

Chrysophyta

Chrysococcus rufescens var. rufescens Klebs.
C. cordiformis Naum.
Dinobryon bavaricum Imh.
D. borgei Lemm.
D. cylindricum Imh.
D. cylindricum var. palustre Lemm.
D. divergens Imh.
D. sertularia Ehr.
D. pediforme (Lemm.) Stein.
Kephyrion ovum Pasch.
Mallomonas caudata Ivan.
Stenokalyx densata Schmid.

Bacillariophyta

Achnanthes minutissima Kutz.
Amphora ovalis Kutz.
Asterionella formosa Hass.
Aulacosira islandica ssp. helvetica O. Mull.
A. italica (Ehr.) Kutz.
A. italica subsp. subarctica (O. Mull.)
A. italica var. tenuissima (Grun.) O. Mull.
A. granulata (Ehr.) Ralfs var. *granulata*
Cocconeis placentula Ehr.
Cyclotella bodanica Eulens. var. *bodanica*
C. comta (Ehr.) Kutz.
C. stelligera Cl. et Grun.
Cymbella cymbiformis (Ag.) Kutz. var. *cymbiformis*
C. hebridica (Greg.) Grun.
C. ventricosa Kutz.
C. turgida (Greg.) Cl.
Gomphonema acuminatum var. coronatum Ehr.
G. olivaceum (Lyngb.) Kutz.
Diploneis ovalis (Hilse) Cl.
D. parva Cl.
Fragilaria crotonensis Kitt.
F. construens (Ehr.) var. *construens*
F. construens var. binodis (Ehr.) Grun.
Gyrosigma acuminatum (Kutz.) Babenh.
Melosira undulata (Ehr.) Kutz.
Navicula radiosa Kutz.
N. cryptocephala Kutz. var. *cryptocephala*

Nitzschia acicularis W. Sm. var. *acicularis*
N. vermicularis (Kutz.) Grun.
N. sigmoidea (Ehr.) W. Sm.
Pinnularia undulata Greg.
P. interrupta W. Sm.
Rhizosolenia longiseta Zach.
Stauroneis anceps Ehr.
Stephanodiscus astrea (Ehr.) Grun.
Synedra ulna (Nitzsch.) Ehr.
S. acus Kutz.
Surirella biseriata var. constricta Grun.
Tabellaria fenestrata (Lyngb.) Kutz.

Pyrrophyta

Peridinium cinctum (O. F. Mull.)
Gymnodonium sp.
Cryptomonas sp.

Euglenophyta

Trachelomonas volvocina Ehr.
T. hispida (Perty) Stein emend. Delf.
Euglena acus Ehr.

Chlorophyta

Ankistrodesmus fusiformis Corda.
Chlamydomonas monadina Stein.
Cosmarium phaseolus Breb.
Crucigenia tetrapedia (Kirchn.) W. et W.
C. fenestrata (Schmidl.) Schmidl.
Didymogenes palatina Schmidl.
Monoraphidium mirabile (W. et G. S. West)
M. komarkova Nyg.
M. contortum (Thuret.) Komarkova-Legenerova
Planctococcus sphaerocystiformis Korschik.
Pediastrum duplex Meyen.
P. tetras (Ehr.) Ralfs.
P. boryanum (Turp.) Menegh.
Scenedesmus quadricauda (Turp.) Breb.
S. quadricauda var. cetosus Kirchn.
S. bijugatus (Turp.) Kutz. var. *bijugatus*
Staurodesmus triangularis (Lagerh.) Teil.
S. leptodermus (Lund.) Teil. Cl.
Sphaerocystiformis schroeteri Chod.
Tetraedron minimum (A. Braun.) Hansg.
Koliella longiseta (Vischer.) Hing.
Oocystis lacustris Chod.
O. solitaria Witttr.

ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НЕКОТОРЫХ ЛУГОВЫХ РАСТЕНИЙ ЗАОНЕЖЬЯ

О. М. ФЕДОРЕНКО, А. И. САВУШКИН, Г. С. ОЛИМПИЕНКО

Институт биологии Карельского научного центра РАН

Сравнительный анализ генетической структуры природных популяций *Festuca pratensis* и *Arabidopsis thaliana* по некоторым ферментным локусам в Заонежье не выявил значимых различий между популяциями аномальных радиогеохимических зон и контрольными популяциями. Тем не менее в популяциях *F. pratensis* из аномальных зон отмечено некоторое снижение репродуктивной способности растений и увеличение генетического груза мутаций, что может быть связано, во-первых, с системой размножения данного вида и, во-вторых, с его большей, по сравнению с *A. thaliana*, радиочувствительностью. Перекрестное опыление способствует накоплению рецессивных изменений в популяциях и более медленному очищению от них по сравнению с самоопыляющимися видами. Повышенный радиационный фон в Заонежье – природный фактор, действующий на протяжении исторически длительного периода времени. По-видимому, популяции самоопыляющегося вида – *A. thaliana* – уже очистились от груза мутаций и эволюционировали в сторону повышения радиоустойчивости (создания радиоустойчивых форм).

O. M. FEDORENKO, A. I. SAVUSHKIN, G. S. OLIMPIENKO. GENETIC STRUCTURE OF SOME MEADOW PLANTS POPULATIONS IN ZAONEZHYE REGION

Comparative analysis of genetic structure of natural *Festuca pratensis* and *Arabidopsis thaliana* populations in some isozyme loci at Zaonezhye Region did not reveal significant differences among populations belonging to abnormal radiogeochemical zones and control populations. Nevertheless, in *Festuca pratensis* populations from abnormal zones some decrease in reproduction ability and increase in mutations genetic load was noted. This can be concerned with, firstly, reproduction system of this species, and, secondly, its increased as compared with *A. thaliana* radiosensitivity. Crossbreeding contributes to recessive mutations accumulation in populations and a slower cleaning from them process as compared with self-pollinating species. A higher radiation background in Zaonezhye Region is a natural factor which is acting for already a long historical period of time. Probably, populations of self-pollinating species – *A. thaliana* are by this time cleaned from mutation load and evolved to radiotolerance increase (radiotolerant forms creating).

Ключевые слова: популяции, генетический груз, мутации, панмиксия, ферментные локусы, радиочувствительность, овсяница луговая, арабидопсис.

Заонежский полуостров, в пределах которого расположен Онежский рудный район, характеризуется богатством минерального состава и наличием горных пород с повышенным содержанием радиоактивных элементов. Важнейшие из них – ^{40}K и продукты распада радиоактивных семейств урана и тория. Такие горные породы распространены, главным образом,

в пределах зон разломов, которые выделяются как линейные аномальные радиогеохимические зоны (Савицкий и др., 1992). В связи с этим Заонежский полуостров относится к районам с повышенным радиационным фоном.

Естественный повышенный радиационный фон Заонежья – это фактор среды, действующий на протяжении исторически длительного

периода времени, и поэтому следует ожидать, что определенные микроэволюционные адаптивные изменения населяющих его видов уже произошли, причем для видов с разной степенью панмиксии – различные. Так, накопленный генетический груз рецессивных изменений у перекрестноопыляемых видов растений составляет значительно бóльшую величину по сравнению с самоопыляющимися видами, поскольку вредные генетические изменения в системе гетерозиготности обеспечивают высокую жизнеспособность нормальных особей. Самоопыление ограничивает рекомбинацию, и это приводит к быстрому выщеплению гомозиготных форм и выбраковке мутаций. Несомненным является и то, что генетические последствия повышенного радиационного фона на поверхности Земли всегда имели возможность эффективно «раствориться» в соседних, генетически связанных популяциях.

Н. П. Дубинин и др. (1980) выявили ряд закономерностей хронического воздействия ионизирующих излучений на популяции при низких мощностях доз, важнейшие из которых – закономерности формирования генетического груза в популяциях разных видов, индукция процесса адаптации к этому фактору среды с последующим снижением темпа мутагенеза и феномен увеличения радиоустойчивости особей. Кроме того, разные виды значительно варьируют по своей природной радиочувствительности. Таким образом, исходя из изложенного, мы вправе предположить повышенную радиоустойчивость растений аномальных радиогеохимических зон и, следовательно, незначительный рост частоты мутаций в популяциях Заонежья.

Целью настоящего исследования явилось изучение популяционно-генетической структуры двух видов растений Заонежья с разной степенью панмиксии и радиоустойчивости.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны два вида растений: перекрестноопыляемый злак – овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.) и самоопылитель – резушка Таля (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.) из семейства крестоцветных.

F. pratensis – диплоидный ($2n = 14$) многолетний вид, достаточно удобен в популяционно-генетических исследованиях, имеет обширный ареал распространения. *A. thaliana* – модельный генетический объект с небольшим числом хромосом ($2n = 10$) и коротким вегетационным циклом развития (от одного до нескольких месяцев). Несмотря на то что арабидопсис – самоопыляющийся вид, он характеризуется высокой внутривидовой изменчивостью по морфологическим признакам, хромосомным числам, времени цветения. *A. thaliana* – один из самых радиоустойчивых видов растений (Иванов, 1974).

В исследование взяты три популяции арабидопсиса и семь популяций овсяницы луговой, произрастающие в Заонежье. Ряд из них произрастает в аномальных радиогеохимических зонах. Это Шуньга, Падма (район месторождения благороднометалло-уран-ванадиевых руд Средняя Падма), Великая Губа, Яндомозеро и Толвуя. Для сравнения были взяты контрольные популяции (К): Киж и Вороний остров (юго-восточный мыс Заонежского полуострова). Названия популяций и характеристика мест их произрастания представлены в табл. 12.1.

С каждой популяции собирали зрелые семена, отдельно с каждого из 20–100 растений. Семена проращивали в лабораторных условиях: овсяницу луговую – на фильтровальной бумаге, а арабидопсис – на агаризованной питательной среде под люминесцентными лампами. Выросшие растения анализировали методом электрофореза, предварительно отметив всхожесть и видимые мутации. Приготовление образцов для электрофореза из листьев, разделение и окраску изоферментов проводили по общепринятым методикам (Корочкин и др., 1977). Электрофорез шел в блоке полиакриламидного геля в трис-ЭДТА-боратной буферной системе, pH 8,3, при напряжении 200 В в течение 2,5 ч. Популяции *F. pratensis* анализировали по пяти локусам четырех ферментных систем: алкогольдегидрогеназы (ADH), изоцитратдегидрогеназы (IDH), глутаматоксаламттрансаминазы (GOT) и эстеразы (EST), а *A. thaliana* – по семи локусам четырех ферментных систем: IDH, GOT, EST и кислой фосфатазы (ACP). Статистическую обработку полученных результатов проводили, используя стандартные подходы, принятые в популяционно-генетических исследованиях (Животовский, 1983), и компьютерную программу BIOSYS-1 (Swofford, Selander, 1981).

Результаты и обсуждение

В норме в популяциях всякого вида с определенной частотой и регулярно в каждом поколении возникают мутации. Изменение мутагенности факторов среды ведет к подъему мутабельности и увеличению в популяциях числа генетических жертв. При этом увеличивается и генетический груз популяции. Для выявления величины генетического груза в заонежских популяциях определяли репродуктивную способность материнских растений, учитывали видимые мутации и редкие электрофоретические белковые варианты. Некоторые из них можно отнести к мутациям.

Репродуктивная способность Festuca pratensis Huds. Изучение репродуктивной способности вида дает представление о доле генетических нарушений, снижающих значения этого показателя. Часть мутаций приводит к нарушению макроспорогенеза и микроспоро-

Таблица 12.1. Характеристика мест произрастания популяций растений в Заонежье

Вид растения	Популяция	Место произрастания	Ботаническое описание места произрастания
Festuca pratensis 2000 г.	Падма	Вдоль лесной дороги (~ в 2 км от Медных ям)	Злаково-разнотравное сообщество. Преобладают: ежа сборная, несколько видов мятликов и осок, звездчатка; сопутствуют – ромашка, короставник
	Шуньга	Низинный луг недалеко от поселка (~1 км)	Травостой в основном злаковый с примесью разнотравья. Преобладают: ежа сборная, тимopheевка, мятлик луговой; реже – овсяница высокая, пижма, ромашка
	Кизи (К)	Сенокосный луг, вдоль дороги	Разнотравно-злаковый травостой с преобладанием тимopheевки луговой, мятлика лугового, довольно много манжеток; реже встречаются – ежа сборная, овсяница красная, поповник, тысячелистник, земляника, подмаренник
	Шуньга	Низинный луг недалеко от поселка (~1 км)	Травостой в основном злаковый с примесью разнотравья. Преобладают: ежа сборная, тимopheевка, мятлик луговой; реже – овсяница высокая, пижма, ромашка
	Великая Губа	В деревне у огородов	Разнотравье: ежа сборная, крапива двудомная, несколько видов мятлика
2001 г.	Яндомозеро	Обочина лесной дороги от Великой Губы до Яндомозера	Травостой в основном злаковый: ежа сборная, овсяница красная, несколько видов мятликов. Редко: коровяк
	Толвуя	Скалистый берег Онежского озера	Травостой в основном злаковый: ежа сборная, овсяница красная, мятлик луговой. Редко: земляника, звездчатка
	Вороний Остров (К)	Деревня, на берегу Онежского озера	Разнотравье с преобладанием мятликов, ежи сборной, иванчая, козлобородника. Чуть реже встречаются: тимopheевка, таволга, пырей ползучий, манжетка, льнянка, короставник, поповник, звездчатка, подмаренник, чина луговая, сныть, василек фригийский
	Великая Губа	Вдоль дороги на Яндомозеро, ~1,5 км от деревни	Разнотравное сообщество. Представлены в равных количествах виды: звездчатка, фиалка трехцветная, щавель, манжетка, лютик едкий, колокольчик, крапива, лапчатка, подмаренник, клевер шуршащий, земляника, тысячелистник, зверобой
	Яндомозеро	Вдоль лесной дороги	Сообщество растений, представленных примерно в равных количествах: звездчатка, подорожник, мятлик, ежа сборная, земляника, ромашка, клевер луговой, подмаренник, бедрениц камнеломка
Arabidopsis thaliana 2001 г.	Толвуя	Скала у Онежского озера	Скальная растительность, растения представлены примерно в равных количествах: очиток, лютик едкий, манжетка, лапчатка, гвоздика, фиалка трехцветная, поповник, звездчатка, клевер, душистый колосок, овсяница красная

генеза, что в свою очередь ведет к аномальной пыльце и неспособности завязывать семена (фертильность соцветия и фертильность растения); другие мутации – к нарушению эмбриогенеза и потере всхожести семян.

Репродуктивную способность *F. pratensis* оценивали, учитывая среднее число семян в соцветии и их всхожесть. Эти данные представлены в табл. 12.2. Подобные исследования на *A. thaliana* не проводились из-за очень мелких семян и огромного их количества в каждом растении. Всхожесть арабидопсиса оказалась приблизительно равной во всех трех популяциях и в среднем составила около 90%.

Как видно из табл. 12.2, имеются различия в репродуктивной способности овсяницы луговой по годам. Это может быть связано со сроками сбора семян или с естественными годовыми колебаниями фертильности. Тем не менее анализ данных двух лет исследований показал общую тенденцию: фертильность соцветия в популяциях из аномальных радиогеохимических зон с повышенным содержанием радиоактивных элементов (Падма, Шуньга, Великая Губа, Яндомозеро) ниже по сравнению

с контрольными популяциями (Кизи, Вороний остров). Сравнение по множественному критерию Шеффе (Шеффе, 1980) показало достоверность различий между двумя группами популяций как в 2000, так и в 2001 г. исследований. Исключение составляет Толвуя, в которой среднее число семян в метелке сходно с контрольной популяцией Вороний остров. Относительно всхожести подобная тенденция просматривается недостаточно ясно. По-видимому, очищение наследственности популяций от многих отрицательных изменений, возникших под воздействием радиоактивных излучений аномальных зон Заонежья, в основном произошло на стадии макро- и микроспорогенеза.

Видимые мутации в популяциях *Festuca pratensis* Huds. Видимые мутации трех типов: хлорофилльные, потенциальные летали и морфологически аномальные растения – отмечены только у овсяницы луговой (табл. 12.3). У арабидопсиса мутации подобного типа в изучаемых популяциях не наблюдались. Хлорофилльные мутации отмечены только в Падме и Шуньге, потенциальные летали – во всех популяциях, кроме контроля, причем в Падме и Шуньге

Таблица 12.2. Репродуктивная способность популяций *Festuca pratensis* в Заонежье

Популяция	Год исследования	Количество стерильных растений		Среднее число семян в метелке		Всхожесть	
		N		N		N	
Падма	2000	82	17,1	82	18,33** ± 1,77	52	0,797 ± 0,04
Шуньга		100	16,3	100	21,77* ± 2,04	51	0,759 ± 0,04
Кижы (К)		71	0	71	29,28 ± 2,09	40	0,867 ± 0,02
Шуньга	2001	95	0	95	27,03** ± 2,74	20	0,880 ± 0,05
Яндомозеро		75	0	75	22,75** ± 2,09	31	0,940 ± 0,02
Великая Губа		62	0	62	25,21** ± 2,34	30	0,940 ± 0,03
Толвуя		80	0	80	46,63 ± 2,59	30	0,960 ± 0,02
Вороний остров (К)		81	0	81	43,32 ± 2,86	31	0,950 ± 0,02
Исходная экспериментальная популяция <i>F. pratensis</i> (Николаевская, Олимпиаенко, 1980)		Среднее число цветков в соцветии		223,25 ± 11,56			
	Средняя фертильность соцветия		50,45 ± 1,76				
	Среднее число семян в метелке		~110				

Примечание. * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

Таблица 12.3. Частота видимых мутаций в популяциях *Festuca pratensis* в Заонежье

Популяция	N	Видимые мутации		
		Хлоро- филльные мутации	Потенци- альные летали	Уродли- вые рас- тения
		2000 г.		
Падма	52	0,02	0,08	0,02
Шуньга	51	0,04	0,12	0,02
Кизи (К)	40	0	0	0,05
		2001 г.		
Шуньга	20	0,05	0,25	0,20
Яндомозеро	31	0	0,03	0,07
Великая Губа	30	0	0,03	0,03
Толвуя	28	0	0	0
Вороний остров (К)	26	0	0	0,08

частота их выше. Уродливые растения есть во всех популяциях примерно с равной частотой. Исключение опять же составила популяция Толвуя, где не выявлено никаких видимых отклонений.

Электрофоретический анализ ферментов *F. pratensis* и *A. thaliana*. Из пяти проанализированных ферментных локусов *F. pratensis* (Adh-1, Idh-1, Got-1, Got-2, Est-2) один – Got-2 – оказался мономорфным среди обследованных популяций в 2000 г. и два – Adh-1 и Idh-1 – в 2001 г. Частоты аллелей полиморфных локусов даны в таблицах 12.4, 12.5. Карельские популяции овсяницы луговой изучались ранее в лаборатории генетики Института биологии КарНЦ РАН (Федоренко, Олимпиаенко, 1998), и везде локус Got-2 показал себя как строго мономорфный. Из приблизительно 2000 локус-тестов, выполненных на растениях карельских популяций овсяницы луговой, изменение электрофоретической подвижности локуса Got-2 в Великой Губе – первое, и его можно рассматривать как мутационное событие (табл. 12.5). Редкие белковые варианты отмечены также по локусу Adh-1 в Шуньге и Падме и по локусу Idh-1 – в Падме, т. е. в популяциях аномальных радиогеохимических зон. Частоты редких белковых вариантов в популяциях *F. pratensis* представлены в табл. 12.6.

Анализ аллельных частот позволяет заключить, что популяционно-генетическая структура

Таблица 12.4. Частоты аллелей полиморфных локусов в заонежских популяциях *Festuca pratensis*, 2000 г.

Локус	Популяция		
	Кизи	Шуньга	Падма
Adh-1			
(N)	32	43	50
F	1,000	0,977	0,960
S	0	0	0,020
B	0	0,023	0
O	0	0	0,020
Idh-1			
(N)	31	31	33
F	1,000	1,000	0,970
S	0	0	0,030
Got-1			
(N)	28	25	29
F	0,821	0,920	0,862
S	0,179	0,080	0,138
Est-2			
(N)	28	37	41
F	0,446	0,446	0,439
S	0,268	0,176	0,244
I	0,268	0,378	0,317
K	0,018	0	0

Таблица 12.5. Частоты аллелей полиморфных локусов в заонежских популяциях *Festuca pratensis*, 2001 г.

Локус	Популяция			
	Великая Губа	Яндомозеро	Толвуя	Вороний остров
Got-1				
(N)	23	20	14	–
F	0,870	0,925	0,643	–
S	0,130	0,075	0,357	–
Got-2				
(N)	26	21	22	–
F	0,962	1,000	1,000	–
S	0,038	0	0	–
Est-2				
(N)	30	29	28	26
F	0,433	0,414	0,571	0,327
S	0,400	0,276	0,214	0,288
I	0,167	0,276	0,214	0,385
M	0	0,034	0	0

овсяницы луговой Заонежья по ферментным локусам является типичной для перекрестно-опыляемых видов растений и сходна с изученными ранее карельскими популяциями этого же

Таблица 12.6. Частота редких аллелей в популяциях *Festuca pratensis* в Заонежье

Популяция	N	Редкие аллели ферментных локусов		
		Изменение электрофоретической подвижности белка	«0»-аллель	Низкая активность фермента
2000 г.				
Падма	42	0	0,05 (Adh, Idh)	0
Шуньга	44	0	0	0,02 (Adh)
Кизи (К)	40	0	0	0
2001 г.				
Шуньга	—	—	—	—
Яндомозеро	30	0	0	0
Великая Губа	30	0,04 (Got-2)	0	0
Толвуя	28	0	0	0
Вороний остров (К)	26	0	0	0

вида: частоты аллелей полиморфных локусов во всех популяциях сходны, т. е. частым является один и тот же аллель. Об отсутствии существенных дифференциаций между популяциями свидетельствуют и значения показателя генетической идентичности (I_N). Средняя генетическая идентичность между парами популяций составила $I_N = 0,995$. Для сравнения приведем данные прошлых лет: генетическая идентичность в разных группах популяций и в разные годы исследований изменялась от 0,995 до 0,981 (Федоренко, Олимпиенко, 1998). Тем не менее одна популяция несколько отличается от других по частотам аллелей ферментных локусов – и это снова Толвуя. Генетические дистанции Нея (D_N) между Толвуйей и остальными заонежскими популяциями овсяницы оказались выше по сравнению с другими парами популяций. С одной стороны, по частоте мутационных проявлений и редким электрофоретическим вариантам эта популяция близка к контролю. С другой стороны, генетические расстояния, вычисленные на основе частот аллелей ферментных локусов, показывают ее исключительное положение. Поскольку популяция Толвуя произрастает на территории с повышенным содержанием урана, на данный момент исследования возможно одно объяснение этого феномена: по-видимому, здесь быстрее идет процесс адаптации к повышенному радиационному фону и темп мутагенеза снижен. Однако для точного подтверждения высказанного предположения необходим эксперимент по оценке степени радиостойчивости растений овсяницы луговой из популяции Толвуя и других популяций Заонежья.

Из семи проанализированных локусов *A. thaliana* (Idh-1, Got-1, Got-2, Asp-3, Asp-5, Est-1, Est-3) четыре оказались мономорфными (Got-1, Got-2, Asp-3, Asp-5). Частоты аллелей полиморфных локусов даны в табл. 12.7. Генетическая структура изученных популяций по ферментным локусам оказалась типичной для самоопылителей: полиморфные локусы имеют

Таблица 12.7. Частоты аллелей полиморфных локусов в заонежских популяциях *Arabidopsis thaliana*

Локус	Популяция		
	Великая Губа	Яндомозеро	Толвуя
Idh-1 (N)	48	39	18
F	0,208	0,603	0,889
S	0,792	0,397	0,111
Est-1 (N)	48	39	18
F	1,000	1,000	0,778
S	0	0	0,222
Est-3 (N)	46	33	7
F	0,152	1,000	0,429
S	0,848	0	0,571

разные высокочастотные аллели в отдельных популяциях. Какие-либо особенные или редкие белковые варианты не выявлены. Хотя существенных генетических различий между заонежскими популяциями арабидопсиса и изученными ранее 10 карельскими популяциями того же вида (Федоренко и др., 2001) не обнаружено, проведенный кластерный анализ (невзвешенный парногрупповой метод Вагнера) показал, что заонежские популяции арабидопсиса группируются в один кластер. Возможно, это объясняется сходством географических и климатических условий произрастания.

Выводы

Таким образом, анализ электрофоретических данных обоих видов не выявил значимых различий популяционно-генетической структуры по пяти ферментным локусам между популяциями аномальных зон и контрольными популяциями Заонежья. Однако в популяциях *F. pratensis* из аномальных зон накоплен определенный генетический груз мутаций. Это хлорофильные мутации, потенциальные летали, редкие электрофоретические варианты белков, нарушения макро- и микроспорогенеза. Увеличение генетического груза *F. pratensis* может быть связано, с одной стороны, с большей радиочувствительностью этого вида по сравнению с *A. thaliana*, а с другой – с системой размножения.

Естественный отбор поддерживает в популяциях самоопылителей значительно более низкую частоту вредных рецессивных аллелей, чем в популяциях перекрестников, так как накопленный генетический груз рецессивных изменений у перекрестноопыляемых видов находится в гетерозиготном состоянии и в связи с особенностями системы размножения довольно редко переходит в гомозиготу. Повышенный радиационный фон в Заонежье – природный фактор, действующий на протяжении исторически длительного периода времени. По-видимому, популяции самоопылителей уже очистились от груза мутаций и эволюционировали в сторону повышения радиостойчивости

(создания радиоустойчивых форм). Однако это предположение требует дальнейшего исследования и подтверждения в эксперименте по оценке степени радиоустойчивости растений обоих видов в Заонежье.

Литература

- Дубинин Н. П., Шевченко В. А., Кальченко В. А. и др., 1980. Генетические последствия действия ионизирующих излучений на популяции // Мутагенез при действии физических факторов. М.: Наука. С. 3–44.
- Животовский Л. А., 1983. Статистические методы анализа частот генов в природных популяциях // Итоги науки и техники. Общая генетика. М.: ВИНТИ. Т. 8. С. 76–104.
- Иванов В. И., 1974. Радиобиология и генетика арабидопсиса. М.: Наука. 191 с.
- Корочкин Л. И., Серов О. Л., Пудовкин А. И. и др., 1977. Генетика изоферментов. М.: Наука. 278 с.
- Савицкий А. В., Титов В. К., Мельников Е. К., 1992. Уран, торий, калий в горных породах Карелии и вопросы радиогеоэкологии // Геология и охрана недр Карелии. Петрозаводск. С. 99–113.
- Федоренко О. М., Олимпиенко Г. С., 1998. Генетическое разнообразие природных популяций *Festuca pratensis* Huds. в Карелии // Генетика. Т. 34, № 3. С. 379–384.
- Федоренко О. М., Савушкин А. И., Олимпиенко Г. С., 2001. Генетическое разнообразие природных популяций *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. в Карелии // Генетика. Т. 37, № 2. С. 223–229.
- Шеффе Г., 1980. Дисперсионный анализ. М.: Мир. 474 с.
- Swofford D. L., Selander R. B., 1981. BIOSYS-1: a FORTRAN program for the comprehensive analysis of electrophoretic data in population genetics and systematics // J. Heredity. V. 72. P. 281–283.

Заключение

На территории Заонежского полуострова выявлен и с различной степенью детальности изучен целый ряд уран-благороднометалльно-ванадиевых месторождений с суммарными запасами и ресурсами пентоксида ванадия 556 тыс. т, большая часть которых относится к категории активных, имеющих экономическое значение. Наряду с активными запасами и ресурсами ванадия гораздо большие (в 10–1000 раз) количества этого элемента и его элементов-спутников сосредоточены в некондиционных рудах и ореолах, образующих под воздействием различных эндогенных, экзогенных и антропогенных факторов обширные природные геохимические аномалии в кристаллических породах, четвертичных отложениях и почвах Заонежья.

Потенциально опасные элементы (Zn, Ni, Co, Cu, Ag, Mo, Pb) содержатся в основном в форме сульфидов в углеродсодержащих породах. Содержание этих металлов значительно увеличивается в конкрециях и стяжениях. На формирование геохимических аномалий сильное влияние оказывает состав пород зон структурно-разрывных дислокаций, к которым приурочены месторождения комплексных Cu-U-Mo-V руд. В этих зонах отмечаются повышенные (до аномальных) содержания Cu, Co, Ni, Cr, Zn, Mo, Bi, Au, Ag, Se, Pt, Pd и других элементов.

Среди природных геохимических аномалий, потенциально наиболее неблагоприятных для человека, выделяются аномалии радиоактивных элементов (U и Rn), выявленные, например, в районе озер Путкозеро – Падмозеро. Наличие горизонтов урановых руд в некоторых залежах торфа Заонежья свидетельствует о происходящих в настоящее время процессах химического выветривания урана из коренных пород, миграции и осаждении его на благоприятных геохимических барьерах, к которым относятся болотные среды.

Почвенный покров, определяющий миграционную способность химических элементов, в пределах Заонежского полуострова очень сложен и мелкоконтурирован. Однородных крупных ареалов почти нет. Каждый выделенный контур представлен сочетаниями 3–4 разновидностей почв. Отличительными чертами почвенного покрова являются: а) широкое распространение буроземов темноцветных, развитых на шунгитовых моренных и водно-ледниковых отложениях; б) маломощность почвенной толщи, что обуславливает широкое распространение неполноразвитых фрагментарных почв; в) высокая освоенность территорий, что сказалось на кислотности и минеральном составе почв, находящихся под сельскохозяйственными угодьями.

Богатые углеродом и обладающие высокой сорбционной способностью шунгитовые почвы накапливают тяжелые металлы при их естественном и техногенном поступлении. Подвижность элементов в глеевых и оглеенных почвах ограничена, в восстановительной среде закрепляются практически все элементы. В почвах с высоким содержанием органического вещества и восстановительным режимом могут накапливаться самые токсичные вещества. Накопление микроэлементов в почве увеличивается от песчаных к глинистым, слабопроницаемым и с большой водоудерживающей способностью.

Оценка уровня накопления тяжелых металлов в почвах Заонежья показала, что выше фоновых показателей для Карелии здесь накапливаются Co, Ni, Cr, Pb, а также Cu и Zn, для U и V выделены аномальные зоны.

В пахотных горизонтах многих почв отмечается накопление Sr, что связано с внесением извести и минеральных удобрений.

Верховые торфяные болота питаются в основном за счет аэрогенных источников и являются хорошими эталонами при мониторинге загрязнения среды тяжелыми металлами. Болотные массивы низинного типа, преобладающие в регионе, служат аккумуляторами многих химических элементов, однако аккумуляционная емкость болот ограничена.

Поверхностные и подземные воды Заонежского полуострова выделяются по химическому макрокомпонентному составу среди вод региона повышенной минерализацией и щелочностью, низким содержанием органического вещества. Большинство поверхностных водных объектов, так же как и подземные воды, имеют высокое качество воды, которая пригодна для многих видов водопользования без существенной водоподготовки.

Одной из особенностей Заонежского полуострова является высокая гидрографическая расчлененность территории (34 водосбора). При этом водосборы поверхностных и подземных вод совпадают. Движение последних направлено от водоразделов к ближайшим поверхностным водотокам и водоемам. Отсутствует тенденция направленности подземных стоков в сторону Онежского озера. Поэтому при разработке уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма и отсутствии аэротехногенного загрязнения антропогенное влияние будет касаться ограниченного числа водных объектов при сохранении чистоты остальных.

Сброс подземных вод с высокими концентрациями компонентов может оказывать влияние на физико-химические характеристики реки в меженный период при постоянном объеме подземного водоотлива. Увеличение концентраций растворенных форм U, Mo, Cu, V может представлять серьезную опасность для гидробионтов.

Исследование микрокомпонентного состава в водных объектах Заонежского полуострова показало, что в большинстве из них содержание металлов-микроэлементов находится на уровне регионального фона. В водных объектах, примыкающих к уран-ванадиевому месторождению Средняя Падма, выявлено несколько большее, чем фоновое, содержание U, V и ряда других металлов (Cr, Pb, Ni и пр.), но их концентрация ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Суммарная α -активность достаточно низкая ($<0,02$ Бк/л) при допустимой для питьевых целей 0,1 Бк/л.

В подземных водах месторождения Средняя Падма отмечены максимальные для Заонежья концентрации Li, B, Ge, Br, Ba, а в водах Зажогинского шунгитового месторождения – Al, Be, Cr, Mo, Ag, Ni, Bi, Ta, Co, Se, Zr, Cd. Содержание U и V в подземных водах Онежского рудного района характеризуется равномерным их распределением с наибольшим увеличением в пределах месторождения Средняя Падма (U – до 30, V – до 10 мкг/л). Формирование химического состава подземных вод месторождения Средняя Падма происходит в верхних частях гидрогеологического разреза в зоне активного водообмена, восстановительные условия водоносного горизонта способствуют сохранению рудных элементов в твердой фазе. По этой причине в естественных условиях не наблюдается высоких концентраций рудных элементов в подземных и тем более в поверхностных водах. При открытом способе добычи руды и подъеме ее на дневную поверхность произойдет смена восстановительных условий на окислительные, что будет способствовать выщелачиванию значительно большего количества элементов и приводить к загрязнению водных объектов.

Содержание микроэлементов в илистых донных отложениях озер Заонежья находится в пределах кларковых значений. Наибольшее содержание радионуклидов семейства урана и радия наблюдается в донных отложениях озер Вангозеро, Падмозеро и Путкозеро, что объясняется непосредственной близостью месторождения. Во многих образцах донных отложений обнаружен цезий-137, наибольшая его концентрация наблюдается в оз. Падмозеро, что, по-видимому, связано с «чернобыльским следом».

Изучение растений в зонах природных геохимических аномалий не выявило значимых различий популяционно-генетической структуры растений по сравнению с популяциями контрольных районов, однако у радиочувствительных популяций из аномальных зон накоплен определенный генетический груз мутаций.

При изучении месторождения Средняя Падма выполнен большой объем буровых и горных работ, включая проходку вертикальной шахты глубиной 155 м и 1220 м горизонтальных горных выработок.

Комплекс специальных мероприятий на месторождении Средняя Падма при проходке горных выработок и их ликвидации (радиометрическая сортировка добытой породы, складирование уран-ванадиевой руды в объеме 5300 т (3000 м³) на бетонированной площадке склада-накопителя, химическая очистка шахтных вод от радионуклидов на подземной установке, очистка воздуха в забое с помощью оросительных систем пылеподавления и растворения газов, консервация руды и разведочной шахты по специальному проекту и другие) позволил предотвратить негативные экологические последствия. На это указывают более чем 10-летние регулярные радиометрические, гидрохимические и другие наблюдения, фиксирующие отсутствие участков радиоактивного загрязнения на околосахтной площадке месторождения Средняя Падма и прилегающей к ней местности.

Для более полной и достоверной оценки изменения окружающей среды и определения вероятного эколого-экономического ущерба освоения месторождения Средняя Падма необходимо выполнить весь комплекс экологических исследований и расчетов в соответствии с действующими нормативными актами в области охраны окружающей среды и рационального природопользования.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение (Е. П. Иешко, А. И. Слабунов)	3
Глава 1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И УРАН-ВАНАДИЕВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАОНЕЖЬЯ (А. И. Голубев, Ю. Н. Новиков)	4
Глава 2. ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ЗАОНЕЖЬЯ (И. Н. Демидов)	14
Глава 3. ПОЧВЫ И ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ЗАОНЕЖЬЯ (Н. Г. Федорец, Р. М. Морозова, О. Н. Бахмет, Ю. Н. Ткаченко)	20
Глава 4. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ ЗАОНЕЖСКОГО ПОЛУОСТРОВА. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ (П. А. Лозовик, М. И. Басов, М. Б. Зобков)	35
Глава 5. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ЗАОНЕЖЬЯ (Г. С. Бородулина, С. И. Мазухина)	47
Глава 6. ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР ЗАОНЕЖЬЯ (Н. В. Виноградова)	55
Глава 7. ПРОГНОЗИРУЕМОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД РАДИОНУКЛИДАМИ ПРИ ДОБЫЧЕ ВАНАДИЕВОГО СЫРЬЯ (Р. В. Богданов, Н. В. Виноградова, Е. А. Шиловская)	59
Глава 8. ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕР ЗАОНЕЖСКОГО ПОЛУОСТРОВА (Н. А. Белкина)	65
Глава 9. СОДЕРЖАНИЕ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВБЛИЗИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАДМА (А. И. Максимова)	72
Глава 10. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ЗАОНЕЖЬЯ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ (Д. С. Рыбаков)	82
Глава 11. КАЧЕСТВО ВОД ОЗЕРА ПАДМОЗЕРО (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ) НА ОСНОВЕ СОСТОЯНИЯ БИОТЫ (Л. П. Рыжков, А. А. Лукин, В. И. Кухарев, А. В. Рябинкин, Т. П. Куликова, Н. А. Мельник, Т. А. Чекрыжева, И. М. Крупень)	89
Глава 12. ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НЕКОТОРЫХ ЛУГОВЫХ РАСТЕНИЙ ЗАОНЕЖЬЯ (О. М. Федоренко, А. И. Савушкин, Г. С. Олимпиев)	101
Заключение (Е. П. Иешко, А. И. Слабунов)	107

Научное издание

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ СРЕДНЯЯ ПАДМА**

*Печатается по решению Президиума
Карельского научного центра РАН*

Редактор *Л. В. Кабанова*
Оригинал-макет *Т. Н. Люрина*

Серия ИД. Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99 г. Сдано в печать 14.06.2005 г. Формат 60x84¹/₈.
Гарнитура Pragmatica. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 11,8 + вкл.
Усл. печ. л. 12,7. Тираж 400 экз. Изд. № 5. Заказ № 505

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
Петрозаводск, пр. А. Невского, 50